



Análise numérica de corte e estampagem em punçonadora

BRUNO GABRIEL PINHEIRO MOREIRA

Outubro de 2018

ANÁLISE NUMÉRICA DE CORTE E ESTAMPAGEM EM PUNÇONADORA

Bruno Gabriel Pinheiro Moreira

1060771

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE NUMÉRICA DE CORTE E ESTAMPAGEM EM PUNÇONADORA

Bruno Gabriel Pinheiro Moreira

1060771

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao meu orientador de dissertação, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo apoio constante ao longo de todas as fases deste trabalho, a sua disponibilidade de tempo e de equipamentos, sem os quais não seria possível terminar esta dissertação.

Um agradecimento á empresa Assemblagem de Cofres Fortes Caradonna assim como os seus representantes, nomeadamente o senhor diretor Geral da SFCC Caradonna, Nicolas Vrazinis, e do senhor diretor da Assemblagem de Cofres Fortes Caradonna, Carlos Pinheiro, pelo apoio demonstrado e pela disponibilidade para a realização da recolha de dados e informações na empresa.

Um grande agradecimento aos meus pais, pois apesar de fisicamente distantes estiveram sempre presentes, principalmente em cada um dos momentos de maior dificuldade e desanimo.

Um profundo agradecimento á minha irmã, pelo apoio, ajuda, e motivação em todos os momentos deste longo e por vezes difícil caminho, que foi realizar este trabalho.

À minha namorada, pelo gigante incentivo que me levou a conseguir concluir esta tese.

Um muito grande e sincero obrigado a todos.

PALAVRAS CHAVE

Punçoadora, Corte, Estampagem, Análise numérica.

RESUMO

A procura constante do aumento de produtividade leva a que cada instante se procure otimizar os processos de fabrico existentes e a procura de novos métodos mais eficazes. Para que se seja bem-sucedido é vital um profundo e cada vez maior conhecimento dos processos que se tem em mão.

Este trabalho tem como objetivo aumentar o entendimento do processo de fabrico de corte e estampagem em punçoadora, de modo a procurar entender os fenómenos que ocorrem durante a execução destes processos, de modo a procurar soluções para melhorar o acabamento das peças resultantes destes processos, e a produtividade.

Para tal foi utilizado um *software* de Método de Elementos Finitos de modo a simular vários cortes e estampagens, e assim entender os fenómenos ocorridos ao longo do corte e várias estampagens de diferentes formas.

Foi então possível entender que existe um compromisso entre o acabamento e a longevidade das ferramentas, e que diferentes tipos de geometrias dos punções permitem alterar as forças existentes ao longo de cada processo, e assim esforçar mais ou menos a punçoadora.

KEYWORDS

Punching, Cutting, Stamping, Numerical analysis.

ABSTRACT

The constant search for increased productivity means that every moment we try to optimize the existing manufacturing processes and the search for new and more efficient methods. To be successful, a deep and growing knowledge of the processes at hand is vital.

The aim of this work is to increase the understanding of the cutting and punching process in order to understand the phenomena that occur during the execution of these processes, in order to find solutions to improve the finishing of the parts resulting from these processes, and productivity.

For this purpose a Finite Element Method software was used in order to simulate various cuts and stamping, and thus to understand the phenomena that occurs along the cut and several stamping in different ways.

It was then possible to understand that there is a compromise between the finish and the longevity of the tools, and that different types of punch geometries allow to change the forces existing throughout each process, and thus to load more or less the punch.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ATM's	Automated Teller Machine (Caixa Multibanco)
C	Carbono
CNC	Comando Numérico Computacional
FEM	Finite Element Method
GNT	Gurson, Tvergaard and Needleman
J-C	Johnson-Cook
MEF	Método de Elementos Finitos
Mn	Manganês
P	Fósforo
S	Enxofre

Lista de Unidades

GPa	Giga Pascal ($1\text{GPa} = 1.000.000.000\text{Pa}$)
kg/dm^3	Quilograma por Decímetro ao Cubo ($1\text{ kg/dm}^3 = 1000\text{ kg/m}^3$)
kN	Kilo Newton ($1\text{ kN} = 1\,000\text{ N}$)
kW	Kilo Watt ($1\text{kW} = 1000\text{ W}$)
mm	Milímetro ($1\text{ mm} = 0,001\text{ m}$)
mm/minuto	Milímetro por Minuto ($1\text{mm/minuto} = 1.66667\text{E-5 m/s}$)
mm/s	Milímetro por Segundo ($1\text{mm/s} = 0.001\text{ m/s}$)
mm^2	Milímetro quadrado ($1\text{mm}^2 = 0.000001\text{m}^2$)
N	Newton (unidade SI)
N/mm^2	Newton por Milímetro Quadrado ($1\text{ N/mm}^2 = 1.000.000\text{ Pa}$)

Lista de Símbolos

F_c	Força de Corte
K	Coeficiente de resistência
L	Comprimento
L_c	Perímetro de Corte
n	Coeficiente de encruamento
r	Coeficiente de anisotropia
\bar{r}	Anisotropia média
R_c	Resistência de Corte
t	Espessura
w	Largura
ϵ	Coeficiente de deformação
σ	Tensão
σ_c	Tensão de Corte

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Anisotropia	Comportamento diferente segundo diferentes direções, devido a alinhamento de grãos e defeitos durante operações de deformação plástica.
Conformação Plástica	Conjunto de processos que, aproveitando as propriedades de ductilidade, maleabilidade e tenacidade de alguns materiais, permitem conferir uma pré-forma comercial (semiproduto) ou a forma final (produto) através da incorporação de trabalho mecânico de deformação.
Corte	Separar ou dividir por meio de um objeto cortante.
Deformação	Variação relativa do volume ou da forma de um corpo sob a ação de forças aplicadas.
Encruamento	É um fenómeno caracterizado pela resistência ao deslizamento dentro dos cristais devido a deslocamentos provocado por deformação a frio.
Estampagem	Conjunto de operações executadas na matéria-prima bruta, de forma que geralmente se obtém, ao final do processo, um produto acabado em termos de forma e dimensões.
Matriz	parte inferior de uma ferramenta utilizada numa prensa, para operações de estampagem, forjamento ou corte de peças.
Punção	Objeto utilizado para perfurar determinada superfície.
Tensão	Força por unidade de superfície.
Tensão de Rotura	Tensão para a qual o material rompe.
Tensão Limite de Elástico	Tensão máxima que pode ser aplicada a um material sem que este apresente deformações permanentes após a retirada da carga.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama tensão deformação, característico de materiais dúcteis [2].	6
Figura 2 - Deformação no plano da chapa em função dos principais modos de deformação em embutidura [3].	7
Figura 3 - Serra chapas dotado de freios para evitar escorregamento da chapa [3].	8
Figura 4 - Espessuras da chapa quando sujeitas ao dois diferentes modos de deformação, extensão à esquerda e expansão à direita [3].	8
Figura 5 - Influência da espessura e do angulo no retorno elástico [4].	9
Figura 6 - Diagrama da força de corte de perfuração / penetração de punção [6].	10
Figura 7 - Ensaio de tração realizado, em duas etapas, para análise do encruamento [8] na primeira etapa, (a), realiza-se uma primeira caga de tração, na segunda etapa (b) volta-se a tracionar e existe um novo limite elástico.	11
Figura 8 - Diagrama tensão/deformação, para materiais dúcteis, $n=0$, [9].	11
Figura 9 - Diagrama tensão/deformação para materiais frágeis, $n=1$ [9]	12
Figura 10 - Diagrama de tensão/deformação para materiais metálicos, com valores intermédios para n [9].	12
Figura 11 - Representação do processo de laminagem a frio [10].	13
Figura 12 - Esquema com todos os elementos necessários para corte em prensa [13].	16
Figura 13 - Operação de corte em comprimento [13].	16
Figura 14 - Operação de corte, em que A é o desperdício e C a peça [5].	17
Figura 15 - Operação de puncionamento [13].	17
Figura 16 - Operações de entalhe, A, e de arrombamento, B, [5].	17
Figura 17 - Operação de rebordagem [13].	18
Figura 18 - Operação de calibragem [5].	18
Figura 19 - Operação de rebarbagem [5].	19
Figura 20 - Rebordo de corte por punção (criação própria).	19
Figura 21 - Punção de face paralela à chapa [14].	20
Figura 22 - Formas alternativas de ferramentas para entrada gradual na chapa [14].	20
Figura 23 - Cabeça de corte do tipo simples, da marca LVD Strippit [15].	21

Figura 24 - Cabeça de corte tipo torreta da marca LVD Strippit [15].	22
Figura 25 - Configuração de torreta da EuroMac [16].	22
Figura 26 - Punçoadora combinada da Trumpf onde se pode ver as cabeças de corte laser, (esquerda) , e de ferramentas (direita) [17].	23
Figura 27 - Estrutura de punçoadora do fabricante LVD modelo STRIPPIT ST/VT, com dois pilares, [15].	24
Figura 28 – Estortura com apenas um pilar, com malha para ser analisada, da Accurl [18].	24
Figura 29 - Sistema de acionamento Single AC Servo Drive, da Amada [19].	25
Figura 30 - Sistema AC <i>servo direct twin drive</i> da Amada [19].	25
Figura 31 - Sistema de acionamento mecânico Accurl [18].	26
Figura 32 - Sistema Delta Drive da Trumpf [17].	26
Figura 33 - Sistema da EuroMac Flex Hybrid System [16].	27
Figura 34 - SheetMaster da Trumpf [17]	28
Figura 35 - Conjunto de pinças para prender a chapa da EuroMac [16].	29
Figura 36 - Alçapão para remoção de peças da mesa de trabalho numa punçoadora da EuroMac [16].	30
Figura 37 – Equipamento Amada UR-UL [19].	30
Figura 38 - ShearMaster, equipamento para remoção e fragmentação do esqueleto restante da chapa [17].	31
Figura 39 - Ferramentas de corte e os seus componentes, punção, serra-chapas e matriz [20].	31
Figura 40 - Punções com respetivos serra juntas de elastômero [21].	32
Figura 41 - Folga da matriz em função do material e da espessura da chapa [12].	32
Figura 42 - Ferramenta para estampagem com ausência de serra chapas [22].	33
Figura 43 - Ferramenta para estampagem com serra juntas [22].	33
Figura 44 - Ferramenta de granar, símbolo elétrico de cabo de terra [23].	34
Figura 45 - Montagem de ferramenta da Trumpf, máquina de cabeça única [24].	35
Figura 46 - Constituição exemplo de uma ferramenta de cabeça tipo torreta [25].	35
Figura 47 – Ferramentas para punçoadoras de torreta de diferentes dimensões da marca Amada [19].	36
Figura 48 - Programa para punçoadora com defeitos e respetivos alertas (criação própria)	37
Figura 49 - Furo realizado por punçoadora com rebarba (imagem própria).	37

Figura 50 - Estudo de refinamento da malha por Soderberg [29].....	40
Figura 51 - Fotos de parte dos equipamentos ao dispor da empresa CARADONNA® [30].	46
Figura 52 - Cofre Star III/IV da gama standard da CARADONNA® [30].....	47
Figura 53 - Armário de compartimentos do catálogo da CARADONNA® [30].	47
Figura 54 - Dimensões dos provetes utilizados para os ensaios de tração, criação própria.	48
Figura 55 - Exemplo de provete utilizado nos ensaios de tração.	49
Figura 56 - Provette preparado para a realização do ensaio de tração com o extensómetro.	49
Figura 57 - Provetes após a realização dos ensaios de tração.....	50
Figura 58 - Gráfico dos ensaios de tração deslocamentos dos ensaios de tração realizados.	50
Figura 59 - Interface do software Simula Abaqus/CAE.....	52
Figura 60 - Corpo de punção convertido em casca com o ponto de referência.....	53
Figura 61 – Assemblagem do punção, matriz e provete para a criação de uma nervura.	54
Figura 62 - Caracterização do contacto entre punção e a chapa, na análise do degrau.	55
Figura 63 - Encastramentos e forças exteriores aplicadas no modulo <i>Load</i> , na análise da nervura.	55
Figura 64 - Interação entre os diferentes elementos da análise do quadrado de 10 mm.	58
Figura 65 - Indicação da velocidade, do punção quadrado de 10 mm.....	58
Figura 66 - Forças exteriores aplicadas ao conjunto, no separador <i>load</i> , na simulação de corte do redondo de 20 mm e chapa de 3 mm de espessura.....	59
Figura 67 - Malha do provete de chapa com 3 mm de espessura, e punção de 40 mm de diâmetro.	59
Figura 68 - Matriz e punção para a execução de nervura em chapa de.....	61
Figura 69 - Dimensões da nervura analisada.....	61
Figura 70 - Malha do conjunto para a análise do processo da nervura.	62
Figura 71 - Ferramentas para o fabrico do degrau.....	62
Figura 72 - Forma final do pormenor a analisar, com a ferramenta degrau.	63
Figura 73 - Ferramentas para o fabrico do "Degrau".	63
Figura 74 - Matriz para fabrico do degrau.....	64
Figura 75 - Punção de Ø 20 mm e as respetivas matrizes para as chapas das espessuras em estudo.	65
Figura 76 - Modelo das dimensões do punção de Ø10 mm e da matriz para o corte de chapa de 3 mm e respetiva folga.	65

Figura 77 - Relação entre o punção e matriz a quando da perda da concentricidade no caso de estudo realizado.....	66
Figura 78 - Relação entre o punção e matriz a quando da perda da paralelismo no caso de estudo realizado.	67
Figura 79 - Punção com formato <i>rooftop</i> , [34].....	68
Figura 80 - Verificação do ângulo das ferramentas do tipo <i>rooftop</i> da Trumpf.....	68
Figura 81 - Dimensões do punção tipo <i>rooftop</i> analisado.....	69
Figura 82 - Punção com formato <i>Whisper</i> , ou cunha [33].....	69
Figura 83 - Dimensões do punção tipo <i>Whisper</i> analisado.	70
Figura 84 – Respiros obtidos a partir da operação a ser analisada [24].....	70
Figura 85 - Punção e matriz utilizadas para o fabrico de respiros.....	71
Figura 86 - Desenho técnico das ferramentas para o fabrico de respiros.....	71
Figura 87 - Chapa após realização da nervura.....	72
Figura 88 - Valores da força e deslocamento na operação nervura.....	73
Figura 89 - Instante em que o punção pressiona toda a chapa contra a matriz.	73
Figura 90 - Corte pelo centro da nervura apos o final da simulação.....	74
Figura 91 - Resultado final do provete de chapa na análise do degrau.	74
Figura 92 - Valores da força e deslocamento obtidos na análise do degrau.....	75
Figura 93 - Instante da análise do degrau em que termina a primeira fase.....	75
Figura 94 - Instante da análise do degrau em que termina a segunda fase.....	76
Figura 95 - Terceira fase do fabrico do degrau.....	76
Figura 96 - Momento final da análise do degrau.....	77
Figura 97 - Elementos utilizados para a realização da análise do furo redondo de diâmetro de 10 mm e chapa de 3 mm de espessura.....	77
Figura 98 - Valores da análise ao punção de 10 mm de diâmetro.	78
Figura 99 - Fase onde o punção pressiona a chapa contra a matriz provocando compressão.	78
Figura 100 - Início do corte por cisalhamento.....	79
Figura 101 - Instante em que se inicia o corte por arrancamento.	79
Figura 102 - Instante em que a chapa fica completamente cortada.....	80
Figura 103 - Valores de força e deslocamento obtidos na análise dos furos de 6 mm de diâmetro.	81

Figura 104 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 10 mm.	82
Figura 105 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 20 mm.	83
Figura 106 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 40 mm.	84
Figura 107 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 45 mm.	85
Figura 108 - Linhas de tendência da força para cada um dos diâmetros analisados.	86
Figura 109 - Elementos utilizados na análise do furo de \varnothing 20 mm e chapa de 3 mm mas com folga de apenas 0,2 mm.....	87
Figura 110 - Ferramentas e chapa para a realização da análise do corte uma folga de 0,4mm.	87
Figura 111 - Valores da força e deslocamentos obtidos nas análises da variação da folga.	88
Figura 112 - Rebarba resultante do corte com folga de 0,2 mm em chapa de 3 mm.	89
Figura 113 - Rebarba resultante do corte com folga de 0,4 mm em chapa de 3 mm.	89
Figura 114 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm e chapa de 3mm, para o corte de forma correta.	90
Figura 115 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm ² e chapa de 3mm, para o corte de com perda de concentricidade.	91
Figura 116 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm ² e chapa de 3mm, para o corte de com perda de paralelismo.	91
Figura 117 - Resultados das análises realizadas.	92
Figura 118 - Estado final da chapa após o corte em condições regulares.....	93
Figura 119 - Estado final da chapa após o corte com a perda de concentricidade.	93
Figura 120 - Estado final da chapa após o corte com a perda de paralelismo.	94
Figura 121 - Análise com punção retangular de perfil plano.....	94
Figura 122 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm e punção plano.	95
Figura 123 - Análise com punção retangular de perfil <i>rooftop</i>	95
Figura 124 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm ² e punção <i>rooftop</i>	96
Figura 125 - Análise com punção retangular de perfil <i>wisper</i>	96
Figura 126 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm ² e punção <i>wisper</i>	97
Figura 127 - Resultados das três análises em conjunto.....	98
Figura 128 - Provete de chapa após a realização do ensaio.....	99
Figura 129 - Força e deslocamento do processo de fabrico do respiro.....	99
Figura 130 - Instante onde termina a fase de compressão e se inicia a fase do corte na análise da operação do respiro.	100

Figura 131 - Instante em a primeira porção de chapa fica completamente cortada, zona central.	100
Figura 132 - Momento em que termina o corte.....	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Critérios para seleção do processo de corte de chapa [11].	15
Tabela 2 - Características das punçadoras existentes na empresa Caradonna [17].	47
Tabela 3: Teores máximos dos elementos constituintes do aço DD11 [32].	48
Tabela 4 - Características espectáveis para ensaio de tração [32].	48
Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de Tração.	51
Tabela 6 - Parâmetros de dano segundo o critério de J-C, adaptada de [33]	57
Tabela 7 - tabela do valor das folgas utilizadas, valores em mm.	65
Tabela 8 - Valores de início das fases de corte para o punção de 6 mm de espessura.	81
Tabela 9 - Valores de início das fases de corte para o punção de 10 mm de espessura.	82
Tabela 10 - Valores de início das fases de corte para o punção de 20 mm de espessura.	83
Tabela 11 - Valores de início das fases de corte para o punção de 40 mm de espessura.	84
Tabela 12 - Valores de início das fases de corte para o punção de 45 mm de espessura.	85
Tabela 13 - Valores das forças máximas para o corte de cada uma das 20 análises.	86
Tabela 14 - Valor da força máxima do corte para cada uma das folgas analisadas.	88
Tabela 15 - Forças máximas obtidas das análises em estudo.	92
Tabela 16 - Valores das forças máximas de corte para os mesmos perímetros de corte e diferentes áreas.	98

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Conformação plástica em materiais metálicos.....	5
2.1.1	Modos de deformação	7
2.1.2	Retorno elástico	9
2.1.3	Encruamento	10
2.1.4	Anisotropia	13
2.2	A operação de corte de chapa	14
2.2.1	Corte em punçoadora	15
2.2.2	Tipos de punçoadoras para corte e estampagem	21
2.2.2.1	Tipos de estruturas	23
2.2.2.2	Sistemas de acionamento	24
2.2.2.3	Sistemas de movimentação	27
2.3	Ferramentas para corte e estampagem em punçoadora CNC	31
2.4	Problemas e defeitos existentes em processos de corte e estampagem em punçoadora CNC..	36
2.5	Simulação numérica de corte e estampagem.....	38
3	DESENVOLVIMENTO.....	45
3.1	Caraterização da empresa que acolheu o projeto	45
ANÁLISE NUMÉRICA DE CORTE E ESTAMPAGEM EM PUNÇONADORA		

3.2	Caraterização dos componentes a fabricar	46
3.3	Caraterização do material.....	48
3.4	Condições da análise numérica realizada.....	51
3.4.1	Análise estática.....	53
3.4.2	Análise dinâmica.....	56
3.5	Simulações realizadas.....	60
3.5.1	Nervura.....	60
3.5.2	Degrau	62
3.5.3	Furos circulares	64
3.5.4	Possíveis defeitos de fabrico	66
3.5.5	Geometrias de penetração.....	68
3.5.6	Respiro.....	70
3.6	Análise dos resultados obtidos	72
3.6.1	Nervura.....	72
3.6.2	Degrau	74
3.6.3	Furos circulares	77
3.6.4	Possíveis defeitos de fabrico	87
3.6.5	Geometrias de penetração.....	94
3.6.6	Respiro.....	99
3.7	Alterações propostas de equipamentos/ferramentas.....	101
4	CONCLUSÕES.....	105
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	109
6	ANEXOS	113
6.1	ANEXO1	113

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Uma das formas mais comuns de matéria prima metálica da indústria nacional é a chapa, podendo esta ser dos mais diversos materiais metálicos, mas o mais comum é o aço nas suas mais diversas variantes, mas para que estas se tornem nos produtos acabados regra geral o primeiro passo realizado é o seu corte, e a conformação dessas mesmas partes, para que depois juntas com outras partes possam dar forma às peças acabadas que abundam na indústrias. Por essa mesma razão, o corte de chapa é uma operação transversal a muito utilizada na indústria metalúrgica, fazendo por isso o corte de chapa com recurso a máquinas de ferramentas uma constante nos mais diversos ramos da indústria, como é o caso do fabrico de eletrodomésticos, autocarros, mobiliário metálico, entre outros, fazendo com que o ser humano viva de objetos que passaram por este processo, sejam eles fabricados no estrangeiro ou em Portugal.

Diariamente na empresa Caradonna são cortadas nas punçadoras dezenas de chapas de aço para o fabrico de cofres e outros elementos de alta segurança. Tendo em conta a procura constante no melhoramento da produtividade, faz todo o sentido um perfeito conhecimento de todos os fenómenos que ocorrem em cada golpe dado por cada uma das punçadoras, para poder tirar o melhor rendimento e cada uma delas.

Nem sempre todas as peças que são cortadas saem perfeitas, e frequentemente surgem algumas com não conformidades. Na maioria dos casos, apesar de estas peças exigirem trabalhos de recuperação, são utilizáveis. Em minoria, existem também aquelas que ficam inutilizadas e, nestes casos, é perdido todo o trabalho já realizado e toda a matéria prima nela gasta.

Assim sendo, faz todo o sentido este estudo mais aprofundado sobre aquilo que é o corte por ferramentas, pois este permitirá também entender a razão pela qual surgem determinados defeitos.

1.2 Objetivos

Com a realização deste trabalho pretende-se compreender melhor o processo de corte e estampagem por punçadora, procurando entender os seguintes pontos:

- Cada passo que compõe o corte de chapa por ferramenta;

- As cargas geradas durante cada um dos passos;
- A distribuição das cargas pela chapa;
- Os efeitos de determinados erros humanos e erros nas máquinas;
- Os passos que compõem a estampagem de formas concretas;
- As cargas geradas no processo de estampagem.

E recolhidos estes dados, verificar o que de bem e de mal é realizado nas instalações da empresa Caradonna.

1.3 Organização do relatório

Este relatório está dividido em dois grandes grupos, os quais representam também as duas principais fases da realização deste trabalho.

A realização da primeira parte consistiu no estudo de todos os aspetos técnicos e teóricos importantes para a compreensão do trabalho que se pretendia realizar. Foi consultada literatura referente ao corte de chapa, e mais concretamente de corte de chapa por ferramentas, tal como literatura referente a estampagem. Em simultâneo procura-se de entender e trabalhar com o programa com o qual viriam a ser realizadas as análises numéricas, e todos os dados que seriam necessários para a realização das mesmas.

Na segunda fase, foram recolhidos os dados para a realização das análises, tanto dados vindos da literatura como os dados experimentais. De seguida foram definidos os parâmetros nos quais seriam realizadas cada uma das análises numéricas, e onde se definiu que as análises do corte e das estampagens seriam realizadas de forma distinta devido à natureza dos processos, já que no primeiro caso existia dano na matéria prima. Por fim foram realizadas as análises, e recolhidos os dados destas foi realizada a análise dos dados, e por fim a obtenção das respostas às perguntas que haviam sido inicialmente colocadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conformação plástica em materiais metálicos

No cotidiano da imensa quantidade de objetos que o homem manuseia, vê-se que uma grande quantidade destes é composto por partes metálicas ou até é mesmo completamente constituído por metal. Saltará também à vista que estes objetos metálicos podem possuir formas completamente distintas entre eles, o que leva a que os processos de fabrico variem com a geometria das peças. Mesmo entre determinados tipos de metais a forma de os trabalhar não pode ser a mesma.

De entre as várias formas de trabalhar os metais, pode-se falar no processo de fundição. Neste processo, o material a trabalhar é levado ao estado líquido e vagado em moldes com as formas finais ou aproximados das peças desejadas.

Um outro processo com grande aplicabilidade é o arranque de aparta. Neste tipo de processo para a criação de uma peça, vai-se removendo material que se encontra em excesso no bloco de material em bruto relativamente à peça pretendida, sendo um processo que implica grande perda de material através de limalhas.

Outra importante forma de obter peças ou esboços de produtos, são os processos de conformação plástica, existindo inúmeras formas de trabalhar os metais, como por exemplo a laminagem, extrusão, para a obtenção de produtos, ou a forjarem, para a obtenção de esboços ou até mesmo peças acabadas. Neste conjunto de processos inclui-se ainda a quinagem, calandragem ou o corte por ferramentas.

Com o grande conjunto de processos por conformação plástica existente, exige-se a existência de outros tantos tipos de equipamentos, para a sua execução, pois raros casos são aqueles um equipamento permite a execução de mais que um processo.

Como tal para o fabrico de peças de qualidade e de forma competitiva na indústria atual as empresas regra geral são obrigadas a ter equipamentos diversificados ou recorrer a serviços de terceiros, pois é o conjunto das várias formas de fabrico que permite que existam produtos tão diversos.

Veja-se o caso de um simples torno de bancada, que para ser fabricado obriga a ao recurso de diversos processos de fabrico, como por exemplo a fundição, conformação plástica e arranque de aparta.

A conformação plástica nos materiais metálicos consiste, de forma muito simples, na criação de uma deformação permanente no material. Para que tal ocorra é necessária a aplicação de forças externas de uma intensidade tal, que seja ultrapassado o ponto em que o material consegue regressar à sua forma original.

Se o limite de tensão de cisalhamento do material for excedido, então os átomos movem-se para o campo de atração dos átomos adjacentes e é alcançado um novo estado permanente de equilíbrio - deformação plástica [1].

Para atingir este estado é sempre necessário atingir um determinado nível de tensão, característico de cada material. Na Figura 1 pode-se ver o comportamento típico dos metais dúcteis nos ensaios à tração,

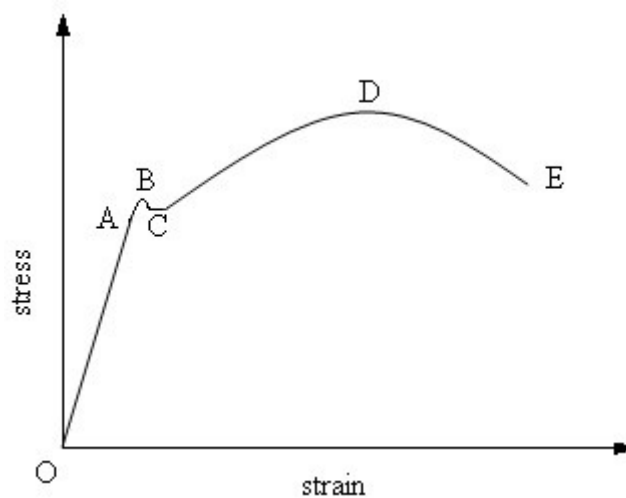


Figura 1 - Diagrama tensão deformação, característico de materiais dúcteis [2].

Na fase inicial, até ao ponto A, verifica-se uma relação de proporcionalidade entre a tensão aplicada e o deslocamento do provete. Durante esta fase, caso se deixe de aplicar a força, o material vai voltar à sua forma inicial. Esta fase é chamada de fase elástica. No entanto, caso se continue a aumentar a força aplicada, e se chegar ao ponto B, tensão de limite elástico, a deformação aplicada ao material será permanente. Continuando a aumentar a força aplicada, não mais existe proporcionalidade entre a tensão exercida no material e a sua deformação.

Em C encontra-se o patamar de cedência. Esta fase não existe em alguns materiais, mas quando existe verifica-se que a uma tensão quase constante, o material continua a aumentar a sua deformação. Esta é uma fase transitória e curta entre a deformação elástica e plástica.

Passada esta fase é de novo necessário aumentar a tensão aplicada para continuar a deformar o material, até que se atinge o ponto D e respetiva tensão de rutura. Esta é a tensão mais alta que o material vai aguentar, e a partir deste ponto o material vai iniciar

a diminuir a sua secção, o que permite que mesmo diminuindo a força aplicada, o material acabe por romper, tensão de rotura, ponto E.

Para um bom entendimento dos processos de corte e de embutidura é necessário um bom entendimento dos fenómenos envolvidos em cada uma das etapas apresenta.

2.1.1 Modos de deformação

Em embutidura pode conceder-se que existem dois tipos distintos de deformação, sendo eles [3]:

- Embutidura por extensão – este modo de deformação implica que a chapa sofra um alongamento positivo (aumento do comprimento e consequente tração) numa dada direção no plano da chapa, e que na direção perpendicular o alongamento seja negativo (diminuição do comprimento e consequente compressão);
- Embutidura por expansão – este modo implica que exista alongamento positivo em todas as direções da chapa (aumento do comprimento e consequente tração).

Para melhor compreensão dos modos de formação considere-se um círculo numa chapa a partir da qual se realizará um embutido. Ao realizar o embutido, este círculo vai-se transformar numa elipse, em que uma das direções é claramente maior que o círculo inicialmente desenhado. Se na direção perpendicular a forma apresentar uma dimensão menor que a inicial, está-se perante uma embutidura por extensão, (Figura 2). Caso o círculo se transforme numa elipse em que ambas as direções principais sejam maiores que o diâmetro do círculo inicial está-se perante uma embutidura por expansão.

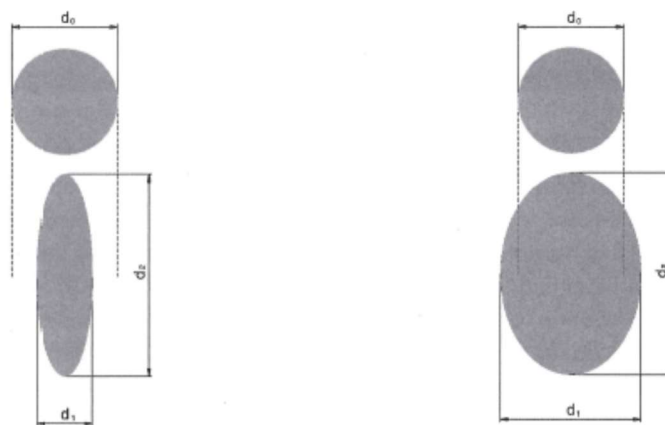


Figura 2 - Deformação no plano da chapa em função dos principais modos de deformação em embutidura [3].

O elemento da ferramenta de embutidura que vai definir que tipo de deformação será realizado numa dada operação é o serra-chapas, pois mediante a pressão que este vai realizar na chapa está-se perante um embutido por extensão ou por expansão.

Caso serra-chapas não exista ou exerça uma pressão insuficiente, o modo de deformação será essencialmente por extensão, mas caso o serra chapas faça uma pressão tal que impeça o escorregamento da chapa entre a matriz e o próprio serra chapas existirá, então o modo de deformação por expansão. Para que o escorregamento da chapa seja alcançado para além de elevadas pressões no serra chapas, é também usual usar se saliências, que podem encontrar-se tanto na matriz como no próprio serra chapas. Estas saliências são designadas de freios, encontra-se descrita Figura 3.

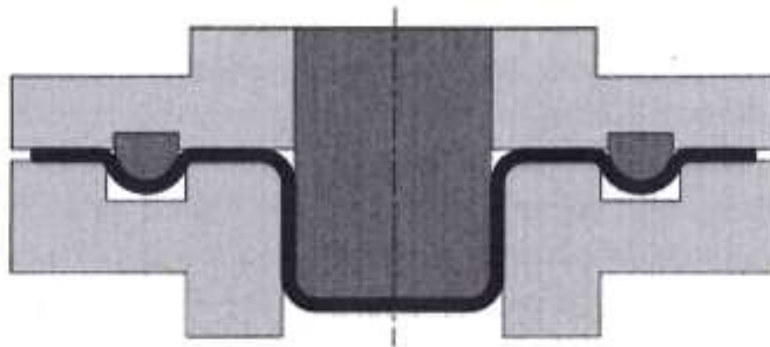


Figura 3 - Serra chapas dotado de freios para evitar escorregamento da chapa [3].

Os dois tipos de embutidura que estão a ser analisados neste capítulo têm também influência direta e distinta na espessura final da peça embutida. Tendo em consideração que o volume da chapa é sempre constante tem-se, então que no caso do modo de deformação por expansão a espessura final da peça é forçosamente inferior a espessura da chapa que lhe deu origem, como se pode ver na Figura 4.

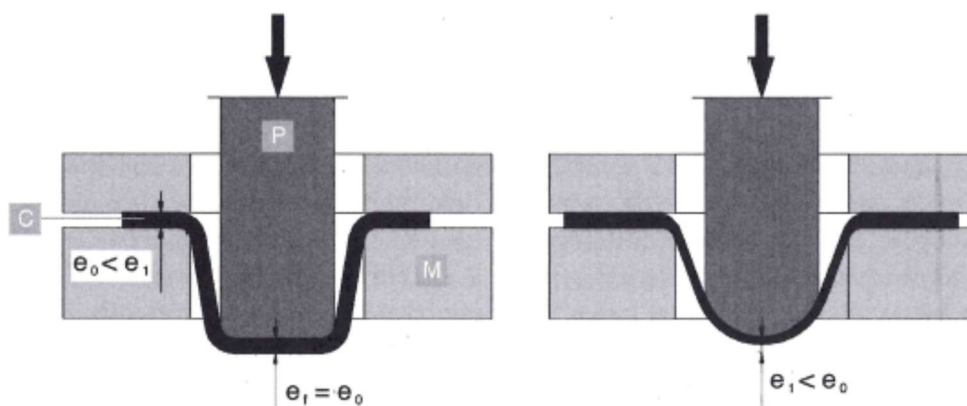


Figura 4 - Espessuras da chapa quando sujeitas ao dois diferentes modos de deformação, extensão à esquerda e expansão à direita [3].

Já no caso da deformação por extensão, a espessura das paredes e do fundo do embutido são iguais à espessura da chapa de origem, mas na gola a espessura tende a aumentar devida às tensões de compressão. No entanto, caso exista serra chapas, este vai ter tendência a evitar este fenómeno, fazendo assim que a chapa mantenha a sua espessura ao longo de todo o processo (Figura 4). Logo, como o peso e o volume não se

alteram durante ação de embutidura conclui-se que a área do esboço e da peça são iguais.

2.1.2 Retorno elástico

Quando se deixa de aplicar uma força num corpo, verifica-se sempre que, mesmo que se tenha deformado o corpo permanentemente, esse corpo vai recuperar parcialmente a sua forma inicial. Este comportamento pode ser quase impercetível, mas existe em todos os materiais, e dá-se pelo nome de retorno elástico.

O retorno elástico é uma propriedade característica de cada material, e diferentes materiais têm diferentes retornos elásticos. Este está relacionado com o módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, mas também com a tensão de limite elástico. Isto é, como nos aços os módulos de elasticidade são idênticos, regra geral valores próximos de 210 GPa, logo quanto maior a tensão de limite elástico maior será o retorno elástico. Esta não é a única característica que influencia o retorno elástico, já que a espessura e a forma da ferramenta também influenciam o retorno elástico, como se pode verificar na Figura 5.

Para um mesmo material, quanto maior a espessura, maior será a capacidade de o material retornar à sua forma inicial. E quanto maior for a deformação imposta pela forma da ferramenta também maior será o retorno [4].

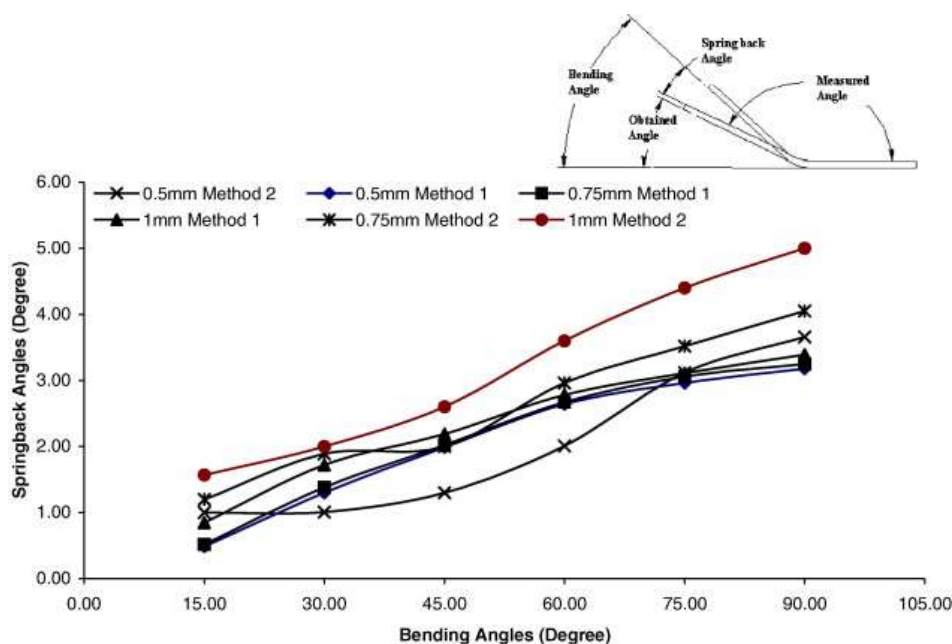


Figura 5 - Influência da espessura e do ângulo no retorno elástico [4].

Pelas várias razões apresentadas anteriormente, o retorno elástico torna-se um importante fator a ter em conta a quando do projeto para ferramentas de estampado e

embutidura, pois serão vários os aspetos a ter em conta para que, após a aplicação da força, as peças finais apresentem as medidas desejadas.

Contudo, mesmo no processo de corte puncionamento, é de ter em conta o retorno elástico, pois devido a este, mesmo após o corte completo e depois da remoção completa da parte a cortar, o punção estará sujeito a forças, pois a chapa vai prender o punção no seu redor. Esta força não será de desprezar, pois apresenta valores próximos de 10% do valor necessário para realizar o corte [5]. Por essa razão, no puncionamento, o punção encontra-se comprimido desde o momento em que inicia contacto com a chapa até que inicio o movimento de retorno, pois a partir deste momento passa estar em tração no sentido em que se movimenta, tal como se pode ver na Figura 6.

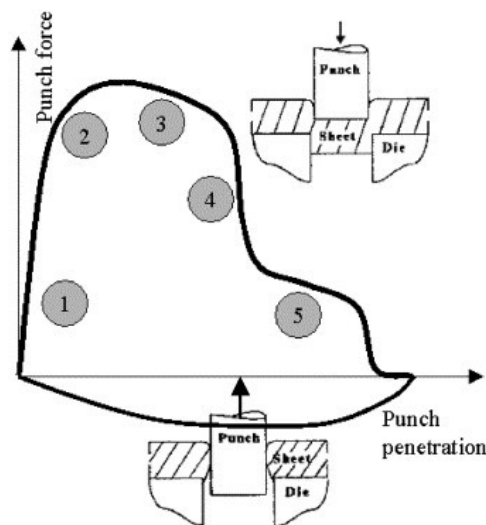


Figura 6 - Diagrama da força de corte de perfuração / penetração de punção [6].

2.1.3 Encruamento

O encruamento ocorre quando os materiais são deformados plasticamente abaixo da temperatura de cristalização e, por essa razão, é usualmente também chamado de trabalho a frio. Quando este fenómeno ocorre, verifica-se que existiu uma recristalização na malha que compõe os materiais. Esta movimentação leva a uma diminuição gradual da mobilidade dos cristais constituintes da malha, tendo como efeito o aumento da dureza, o aumento da tensão do limite elástico e a redução da ductilidade [7].

O ensaio mecânico que melhor permite analisar este fenómeno é o ensaio de tração realizado por etapas. Na primeira etapa, o provete tem de ser carregado, de modo a ultrapassar a tensão de limite elástica e se deforma plasticamente. Chegando a este ponto, retira-se a carga aplicada.

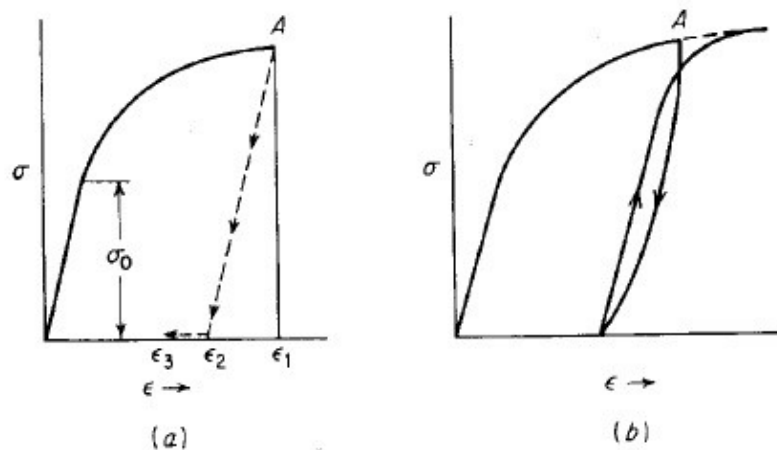


Figura 7 - Ensaio de tração realizado, em duas etapas, para análise do encruamento [8] na primeira etapa, (a), realiza-se uma primeira caga de tração, na segunda etapa (b) volta-se a tracionar e existe um novo limite elástico.

Como se verifica na Figura 7, quando se deixa de aplicar a tensão no ponto A, a deformação vai diminuir de ϵ_1 para ϵ_3 mas, voltando a aplicar a carga, devido à ocorrência do encruamento, verifica-se um aumento da tensão de limite elástico, para valores próximos da tensão anteriormente aplicada no ponto A. Este fenómeno é, em muitos casos, representado pela equação (1),

$$\sigma = K \times \epsilon^n \quad (1)$$

onde K é o coeficiente de resistência, ϵ é a deformação e n o coeficiente de encruamento, sendo considerada a secção real instantânea no provete. A equação é válida para a curva tensão/deformação na fase plástica do material.

Para os diferentes comportamentos de encruamento, o coeficiente de encruamento, n , pode variar entre 0 e 1.

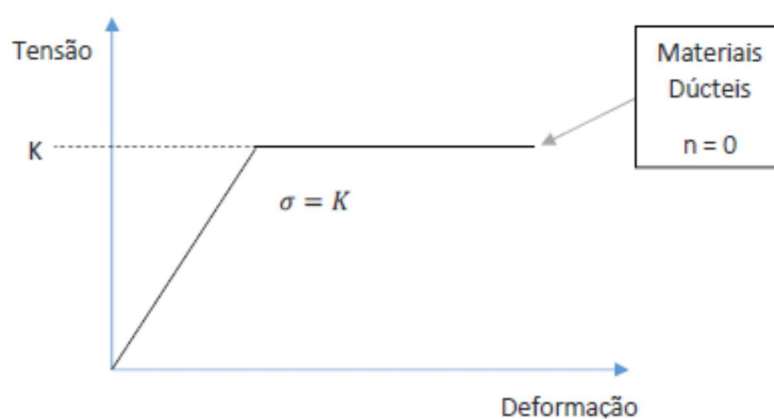


Figura 8 - Diagrama tensão/deformação, para materiais dúcteis, $n=0$, [9].

Para materiais dúcteis n vai ter o valor de 0, logo ε^n é igual a 1, o que implica que σ vai ter um valor igual a K . Logo a deformação vai se dar a valor constante de valor igual ao de K , como se pode ver na Figura 8.

Este comportamento é típico dos materiais poliméricos que, após entrar no regime plástico, se continuam a deformar a uma tensão constante.

Já para materiais frágeis, n vai tomar o valor 1, e nestes casos a tensão vai ser proporcional à deformação. Isto implica que, aumentando a deformação, a tensão vai também aumentar proporcionalmente, como se verifica na Figura 9

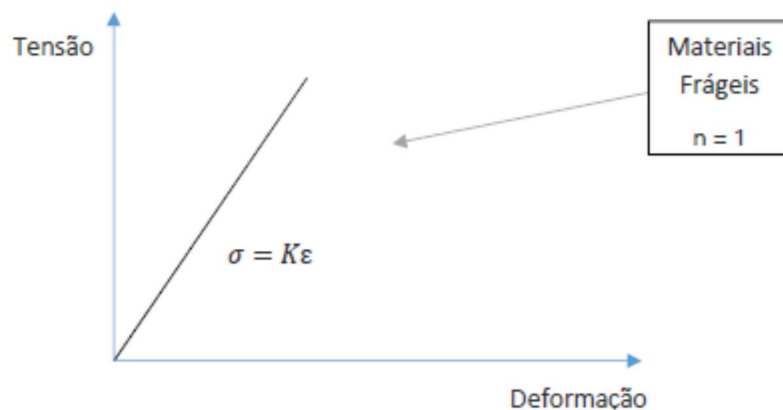


Figura 9 - Diagrama tensão/deformação para materiais frágeis, $n=1$ [9]

Este tipo de comportamento frágil é típico dos materiais cerâmicos.

Os materiais metálicos apresentam um comportamento bem distante dos extremos anteriormente apresentados, isto é, após entrarem no regime elástico é necessário aumentar a tensão para aumentar a deformação, mas esta última não aumentará de forma proporcional ao aumento da tensão. Como tal, estes materiais apresentam um coeficiente de encruamento, n , diferente de 0 e 1, e como um diagrama próximo ao da Figura 10.

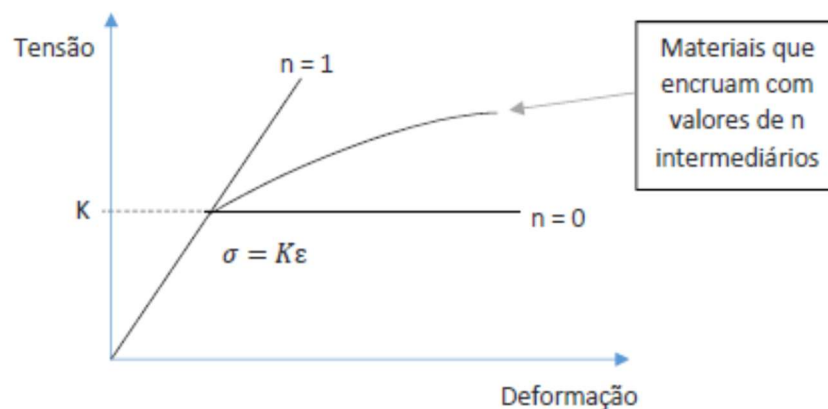


Figura 10 - Diagrama de tensão/deformação para materiais metálicos, com valores intermédios para n [9].

2.1.4 Anisotropia

A anisotropia está diretamente relacionada com a preferência de direção que o grão que compõe a malha de um determinado metal possa ter tendência a formar [7].

A anisotropia tem influência direta na direção em que o metal vai ter maior ou menor tendência a se deformar. Nos materiais isotrópicos, não se verificam estas características, pois estes apresentam características similares em todas as orientações.

Um dos processos de fabrico que propiciam que os metais têm mais tendência a formar os grãos direcionados é a laminagem a frio (Figura 11). Este processo é utilizado para transformar o material em bruto em chapas com as mais variadas espessuras. Durante este processo, o material é esmagado por dois rolos, o que leva o material a estender no sentido longitudinal, já que é a única direção livre. Durante esse processo, o grão do material vai ficar também ele alongado no sentido da laminagem, limitando assim a sua capacidade de se deformar nessa direção posteriormente. Por esta razão, o valor da anisotropia nas chapas de aço é considerável, visto estas terem maior tendência a se deformarem no sentido perpendicular ao sentido de laminação. No entanto, este efeito pode ser atenuado realizando-se a laminagem a quente.

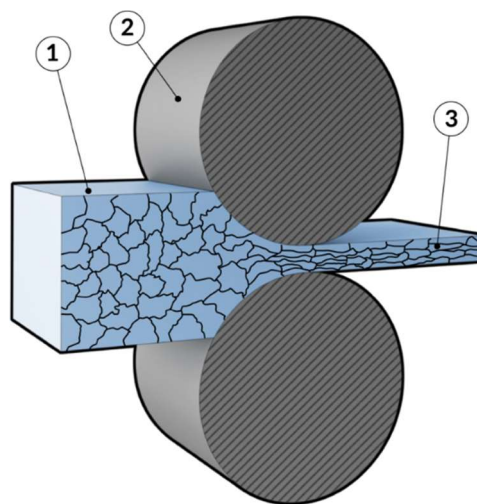


Figura 11 - Representação do processo de laminagem a frio [10].

Para quantificar a anisotropia é utilizado o coeficiente de anisotropia ou de *Lankford*. Para tal, tem de se realizar ensaios de tração seguindo a norma ASTM E17-00 (2010). Esta indica que os provetes devem ser tracionados, sem ultrapassar o ponto de estricção, mas entrando na região da deformação plástica, com as variações do comprimento e da largura. Aplicando a equação (2) calcula-se r , coeficiente de anisotropia planar. Este fator deve ser calculado com provetes retirados da chapa de

cada uma das direções. Os valores de r permite determinar diretamente as referidas direções preferenciais. O valor de r é dado por

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}, \quad (2)$$

onde a deformação real da largura do provete é definida como:

$$\varepsilon_w = \ln(w_f / w_0), \quad (3)$$

onde que w_f é a largura final e w_0 a largura inicial. A deformação real da espessura é definida como:

$$\varepsilon_t = \ln(t_f / t_0), \quad (4)$$

onde t_f é a espessura final e t_0 a espessura inicial.

Contudo, pela grande dificuldade em medir t_f e t_0 , tendo em conta que o volume do provete é constante ao longo de todo o ensaio, geralmente é utilizada a equação (5):

$$r = \frac{\ln(w_f / w_0)}{\ln(L_f w_f / L_0 w_0)}, \quad (5)$$

onde L_f é o comprimento final e L_0 o comprimento inicial.

Após saber a capacidade de deformação em cada uma das direções principais é também importante ter uma noção global da chapa. Para tal, conjuga-se cada um dos coeficientes planares nas proporções indicadas pela equação (6), passando-se assim a saber o coeficiente de anisotropia normal, \bar{r} , o que possibilita a quantificação do quanto o metal conseguirá diminuir de espessura:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (6)$$

onde r_0 , r_{45} e r_{90} são os coeficientes planares de cada uma das direções, a 0° , 45° e 90° , respetivamente.

2.2 A operação de corte de chapa

A operação de corte de chapa é algo tão simples como a separação de matéria de um produto plano, com o objetivo de obter peças acabadas ou esboços.

Atualmente, existem inúmeras formas de corte de chapa. Os métodos mais comuns são, por exemplo, o corte a oxicorte, plasma, laser, jato de água ou corte por ferramentas [11].

Todas elas são utilizadas industrialmente nos tempos que correm, pois, cada uma delas tem as suas vantagens, e claro as suas desvantagens. O critério de escolha do método depende, geralmente, das espessuras de chapa que se vão utilizar, da qualidade dos rebordos, do custo da operação e da produtividade que cada empresa precisa na sua indústria. Na Tabela 1 podem ver-se alguns critérios e respetivos valores para quatro métodos de corte distintos.

Tabela 1 Critérios para seleção do processo de corte de chapa [11].

Tipo de corte	Espessura (mm)	Acabamento	Precisão	Investimento inicial
Punçadora	Até 7	Marcas das ferramentas	Boa	Elevado
Laser	Até 30	Zona termicamente afetada	Boa	Elevado
Jato de Água	De 6,5 até 50	Bom	Boa	Elevado
Plasma	De 6,5 até 30	Zona termicamente afetada	Média	Médio
Oxicorte	Maior que 30	Mau	Baixa	Baixo

Ou seja, caso se pretenda cortar grandes espessuras a melhor opção será o oxicorte, no entanto este vai comprometer na qualidade do acabamento e na precisão de corte, capítulos estes onde o jato de água é bastante vantajoso, mas para espessuras muito pequenas vê as suas vantagens diminuir para o laser.

No entanto neste capítulo vai-se dar destaque ao corte por ferramentas ou em punçadora que, apesar de ser um processo limitado em termos de espessura, de 0,5 mm a 7 mm, nas últimas décadas tem vindo a conhecer um aumento de produtividade e de acabamento que, apesar de geralmente implicar um grande investimento inicial, torna o processo relativamente económico.

2.2.1 Corte em punçadora

O corte em prensa é uma operação mecânica com a qual, mediante ferramentas especiais aptas para o corte, se consegue separar uma parte metálica de outra, obtendo instantaneamente uma forma determinada.

Na maioria das vezes, o corte em prensa consiste, no primeiro passo, para a obtenção de peças em chapa. Tratando-se de um processo de transformação plástica, este tem

familiaridades com a estampagem. De facto, igual forma, inicialmente o punção pressiona a chapa contra a matriz. No entanto neste caso, o punção vai encontrar uma cavidade, para onde vai continuar a pressionar a chapa existente entre ambos. Neste instante vai iniciar-se uma transformação plástica, dando origem a um ventre concavo. Com a continuação da pressão do punção e da deslocação do mesmo, a parte da chapa que se encontra na cavidade da matriz vai acabar por se separar da restante chapa por ação de corte puro (Figura 12), o que dá origem a um furo na chapa com a formato exato correspondente à forma do par punção-matriz [12].

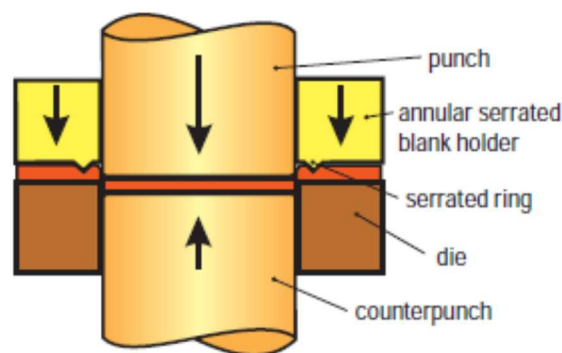


Figura 12 - Esquema com todos os elementos necessários para corte em prensa [13].

Na prensa, com este princípio e utilizando as ferramentas adequadas, é possível realizar diversas operações, tais como [5]:

Corte em comprimento – consiste no corte em toda a largura da chapa ou banda, separando uma parte segundo um contorno não fechado (Figura 13);

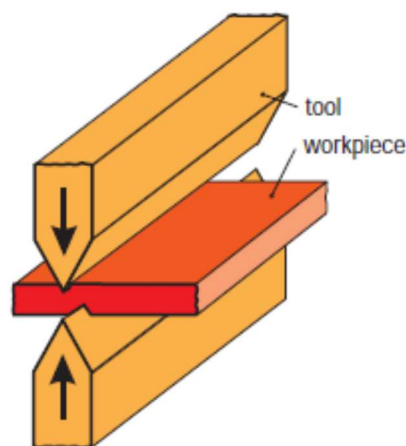


Figura 13 - Operação de corte em comprimento [13].

Corte – consiste na obtenção de uma peça ou esboço segundo um contorno fechado extraída da chapa ou banda, onde a peça pretendida tem a forma da parte separada pelo punção, ou conjunto deles (Figura 14);

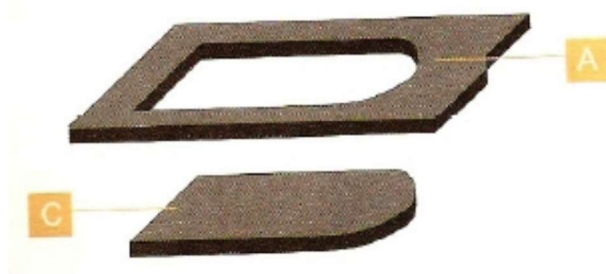


Figura 14 - Operação de corte, em que A é o desperdício e C a peça [5].

Puncionamento – consiste, essencialmente num corte mas, ao contrário do corte simples, a forma parte da matéria retirada da chapa é a parte não desejada, criando assim um furo na peça pretendida. Esta operação, para pequenos diâmetros, é geralmente denominada perfuração, de 1 a 3 vezes a espessura da chapa (Figura 15);

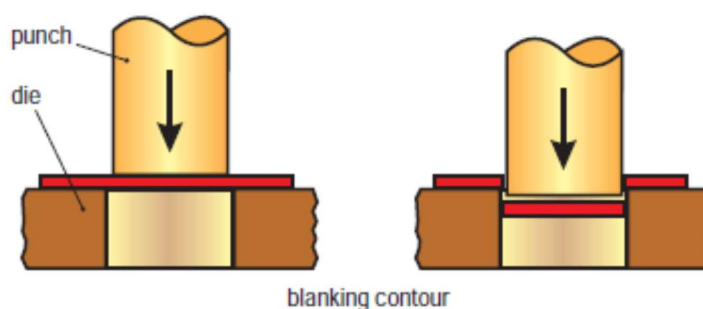


Figura 15 - Operação de puncionamento [13].

Entalhe – é o ato de cortar uma porção de matéria na orla da chapa ou da banda (Figura 16 A);

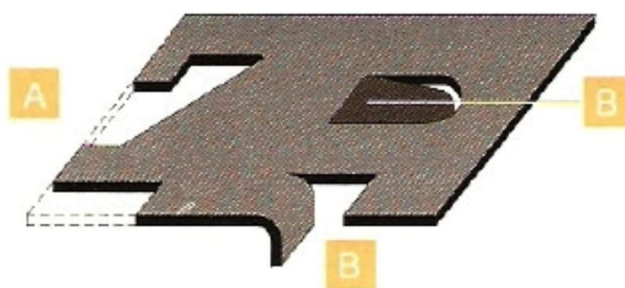


Figura 16 - Operações de entalhe, A, e de arrombamento, B, [5].

Arrombamento – consiste na criação de um corte, mas no qual o material não vai ser removido pois este não é um corte fechado (Figura 16 B);

Rebordagem – consiste na criação de uma gola, pelo corte a partir de um punção com forma pontiaguda, ou sobre um perfil já formado. Regra geral, esta operação é seguida da realização de rosca na peça de chapa (Figura 17);

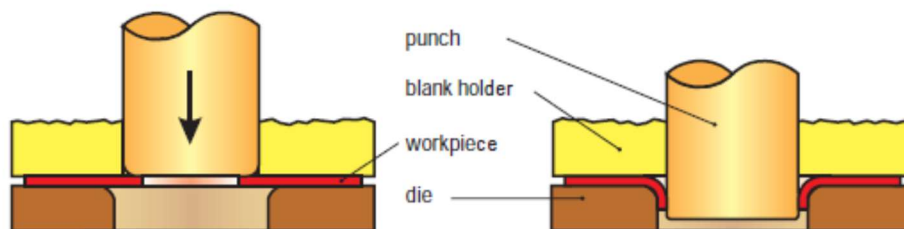


Figura 17 - Operação de rebordagem [13].

Calibragem – é uma operação de acabamento realizada com o intuito de tornar a parede de corte lisa e vertical e com uma maior precisão das cotas. Esta é realizada após o corte ou puncionamento. O material a remover não deve passar geralmente dos 5 a 7% do material anteriormente removido, na generalidade dos materiais, mas aumentando para 8 a 9% em metais mais duros. Nesta operação a folga radial entre a matriz e o punção não deve passar dos 2% da espessura do material a ser cortado, a pequena quantidade de matéria retirada faz com que esta se assemelhe a aparas (Figura 18);

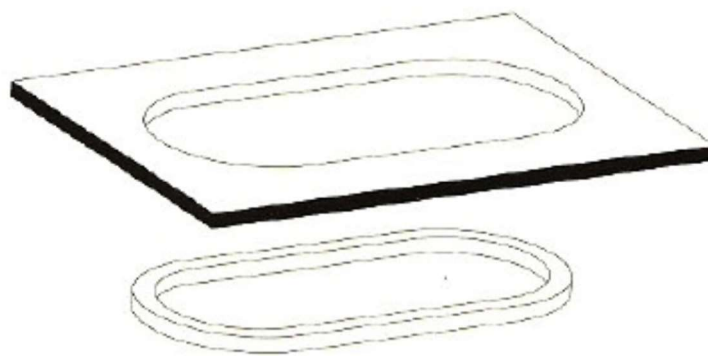


Figura 18 - Operação de calibragem [5].

Rebarbagem – consiste em cortar o excedente de metal existente em redor de peças já conformadas. Podendo ser a gola toda ser removida, caso esta não faça parte da peça final, ou então cortar apenas a parte irregular (Figura 19).

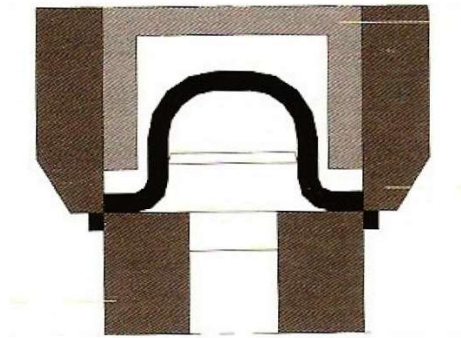


Figura 19 - Operação de rebarbagem [5].

Todas as operações de corte descritas neste capítulo podem ser divididas em três etapas distintas [5]:

- Esmagamento – ocorre após iniciar o contacto entre o punção e a chapa e ainda antes de iniciar o corte. Esta vai ser esmagada contra a matriz, gerando uma tensão de compressão, e sendo obrigada a sair pelo furo da matriz. Nesta fase desenvolvem-se tensões complexas na chapa, inicialmente em deformação elástica, mas que logo passam a plásticas;
- Corte – Prosseguindo com a descida do punção, desenvolve-se então uma tensão tal que se cria uma área de corte puro que dá origem a uma superfície lisa. No decorrer desta fase apenas ocorrem deformações plásticas;
- Rotura – A dado ponto vai-se iniciar, na chapa, uma tensão de tração, que vai dar origem à rutura, acabando por separar as duas partes do material.

Ao observar uma peça cortada por punção é facilmente reconhecível o recurso a este processo pelo aspecto do bordo de corte. Neste, é fácil reconhecer a zona onde ocorre o corte e a rutura, tal como se pode ver na Figura 20, onde a parte superior e mais lisa se trata da zona de corte puro e a zona irregular é a zona de rotura.



Figura 20 - Rebordo de corte por punção (criação própria).

As forças de corte geradas ao longo das três fases anteriormente referidas vão depender não só das propriedades do material da chapa e da sua espessura, mas também da dimensão do punção e da sua geometria de contacto com a chapa.

Assim, para um punção em que a face de contacto é plano e paralelo à chapa, como demonstra a Figura 21, a força de corte pode ser determinada a partir da equação (7):

$$F_c = L_c \cdot e \cdot R_c, \quad (7)$$

onde F_c é a força necessária para realizar o corte, L_c o perímetro de corte, e a espessura e R_c é a resistência ao corte. Esta última depende do material a cortar, mas geralmente calcula-se da seguinte forma:

$$R_c = 0,8 \times \sigma_r, \quad (8)$$

onde σ_r é a tensão de rotura do material.



Figura 21 - Punção de face paralela à chapa [14].

No entanto, é possível reduzir F_c . Para tal, basta que se altere a forma do punção, tornando a sua entrada na chapa gradual. Diferentes formas reduzem de forma diferente F_c , como se pode ver pelas equações apresentadas e respectivas formas dos punções, (Figura 22).



Figura 22 - Formas alternativas de ferramentas para entrada gradual na chapa [14].

Assim sendo, para o punção com a forma A, F_c calcula-se recorrendo à equação (9):

$$F_c = 0.65 \times L_c \times e \times R_c \quad (9)$$

Para forma B, equação (10).

$$F_c = 0.7 \times L_c \times e \times R_c \quad (10)$$

Para forma C, equação (11).

$$Fc=0.5\times Lc\times e\times R_c \quad (11)$$

2.2.2 Tipos de punçadoras para corte e estampagem

As punçadoras são máquinas de corte de chapa com ferramentas, que permitem realizar todas as operações descritas no capítulo 2.2.1.

Tal como outros meios, a punçadora permite facilmente, ter numa só chapa várias peças diferentes, e ter chapas consecutivas com peças distintas entre si, como é o caso do laser ou do jato de água, mas ao contrario destes, permite realizar pequenas estampagens.

As presas também permitem realizar estampagens, e até maiores, no entanto o numero de peças a fabricar tem que ser muito maior, para que se justifique a criação de uma ferramenta para prensa.

Esta combinação de operações e flexibilidade de produção permite que este tipo de máquinas se torne altamente competitiva e rentável.

As punçadoras podem ser classificadas quanto ao tipo de cabeça de corte de que utilizam, e estas podem ser de dois diferentes tipos, de cabeça única (*Single-head*), ou de torreta.

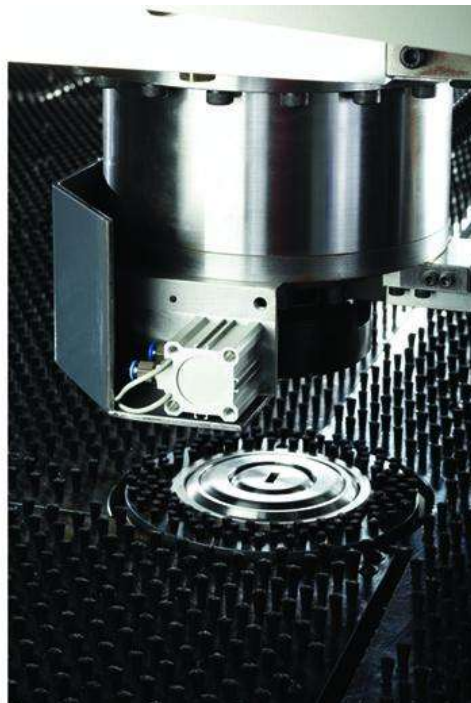


Figura 23 - Cabeça de corte do tipo simples, da marca LVD Strippit [15].

As punçadoras de cabeça única (Figura 23), permitem puncionar, estampar, quinar e roscar [15]. Este tipo de equipamento é disponibilizado por marcas como a Trumpf ou a LVD Strippit entre outras.

A capacidade de elevar a cabeça, e de esta poder rodar 360° permite a este tipo de máquinas realizar de forma muito flexível e rápida um grande conjunto de operações, das quais se podem destacar as pequenas guindagens, até 75 mm de altura, e a roscagem.



Figura 24 - Cabeça de corte tipo torreta da marca LVD Strippit [15].



Figura 25 - Configuração de torreta da EuroMac [16].

As punçadoras de torreta (Figura 24) permitem formas de acionamento mais simples, diminuindo os níveis de consumo de energia, assim como trocas de ferramentas mais

rápidas. Apesar de neste tipo de máquina o número de ferramentas que podem rodar é geralmente limitado, é o tipo de punçoadora com maior oferta no mercado, já que a maioria dos fabricantes recorre a este tipo de sistema. No entanto, o número de ferramentas e respetiva disposição, ou até o número de ferramentas rotativas, pode variar bastante. A Figura 25 é uma proposta de configuração da EuroMac.

Para além destas distinções importantes nas máquinas, podem-se ainda encontrar máquinas que combinam o corte por ferramentas com o corte por laser. Estas são conhecidas por punçoadoras combinadas, (Figura 26).



Figura 26 - Punçoadora combinada da Trumpf onde se pode ver as cabeças de corte laser, (esquerda), e de ferramentas (direita) [17].

2.2.2.1 Tipos de estruturas

No mercado existem inúmeros fabricantes deste tipo de equipamentos. E, apesar de cada fabricante apresentar soluções técnicas distintas, este tipo de máquinas têm sempre vários aspetos em comum.

O facto de a cabeça de corte ser, na maioria dos casos, estática nos eixos XX e YY. Por outro lado, movimentando-se apenas no eixo dos ZZ, e com pequenas amplitudes, obriga a que as máquinas tenham grandes mesas para que a chapa se possa movimentar. Este facto leva a que as mesas de trabalho tenham de ter mais do dobro do tamanho da chapa maior que a máquina consegue trabalhar, pois só desta forma a máquina consegue puncionar em qualquer ponto da chapa.

Como as forças exercidas pelas máquinas são elevadas, podendo chegar as 30 toneladas de força ou até mais, as estruturas base da máquina são bastante robustas, de modo a que aquando de cada golpe executado, a cabeça da máquina não se mova do seu lugar.



Figura 27 - Estrutura de punçadora do fabricante LVD modelo STRIPPIT ST/VT, com dois pilares, [15].

Apesar desta diferença, o tipo de estrutura propriamente dito é idêntico entre todos os fabricantes. Estes apenas tendem a variar no número de pilares de suporte, que variam entre um e dois pilares, como mostra a Figura 27 e Figura 28.

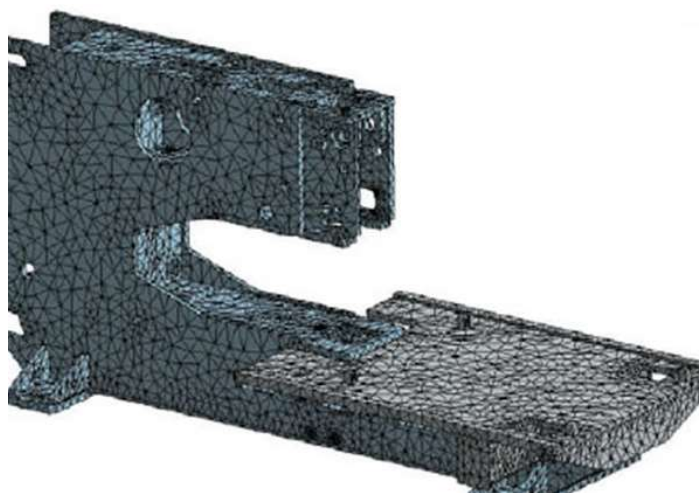


Figura 28 – Estrutura com apenas um pilar, com malha para ser analisada, da Accurl [18].

2.2.2.2 *Sistemas de acionamento*

Os sistemas de acionamento deste tipo de máquinas são bastante variados, pois podem-se encontrar diferentes formas de acionamento das ferramentas de fabricante para fabricante e até mesmo formas diferentes vindas do mesmo fabricante. Apesar das distintas soluções, pode-se dizer que o acionamento das máquinas é de natureza mecânico, hidráulico ou híbrido.

Para exemplificar alguns dos tipos de soluções existentes no mercado serão apresentados, neste capítulo, seis propostas de quatro fabricantes, mas é de referir que existem outros sistemas.

Como exemplo de sistemas acionados mecanicamente, encontram-se duas propostas distintas do fabricante Amada.

Num dos casos recorre-se a um servomotor, que vai rodar de forma ajustada para fazer rodar um fuso roscado que vai criar um movimento de vaivém na extremidade de um cotovelo que, por sua vez, passa esse movimento horizontal em vertical. Este movimento é passado por fim a pistão que vai pressionar as ferramentas contra a chapa. Na Figura 29 pode ver-se este sistema [19].

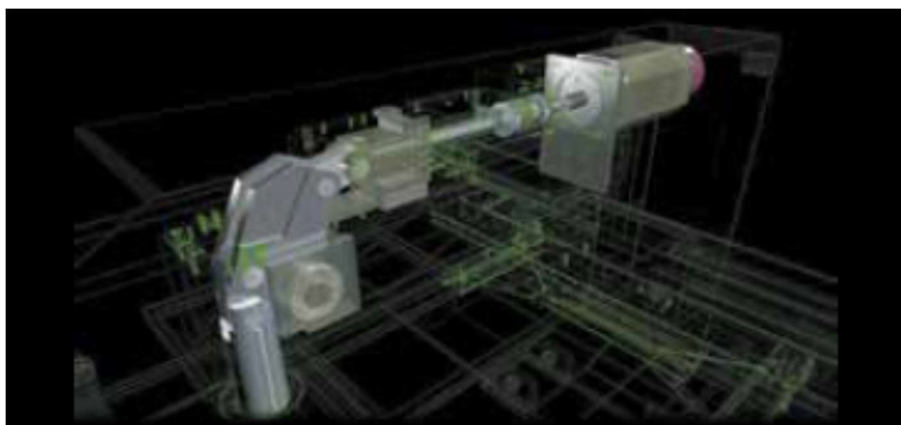


Figura 29 - Sistema de acionamento Single AC Servo Drive, da Amada [19].

O outro sistema proposto pela Amada é um sistema que recorre a dois servomotores conectados a um único veio que no meio contém um excêntrico (tipo árvore de cames) que transforma o movimento rotativo diretamente em movimento vertical. Este sistema é batizado de “AC servo direct twin drive” (Figura 30). Segundo a Amada, este sistema tem como vantagens o reduzido consumo de energia e a não necessidade de um sistema de refrigeração [19].

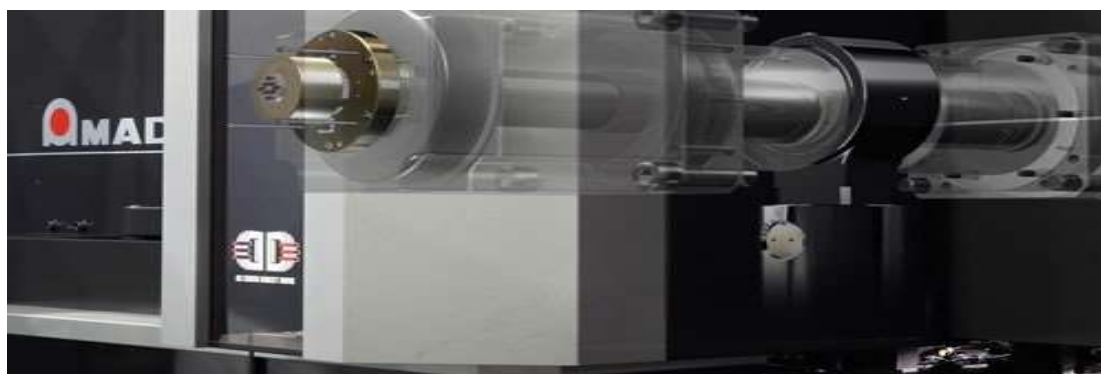


Figura 30 - Sistema AC servo direct twin drive da Amada [19].

O fabricante Accurl oferece uma proposta idêntica à primeira proposta pela Amada, mas neste o motor está instalado de forma perpendicular ao sistema e, em vez de acionar um veio roscado, aciona uma barra, como é possível ver na Figura 31, [18]. Outros fabricantes disponibilizam sistemas idênticos a este, pela sua simplicidade.

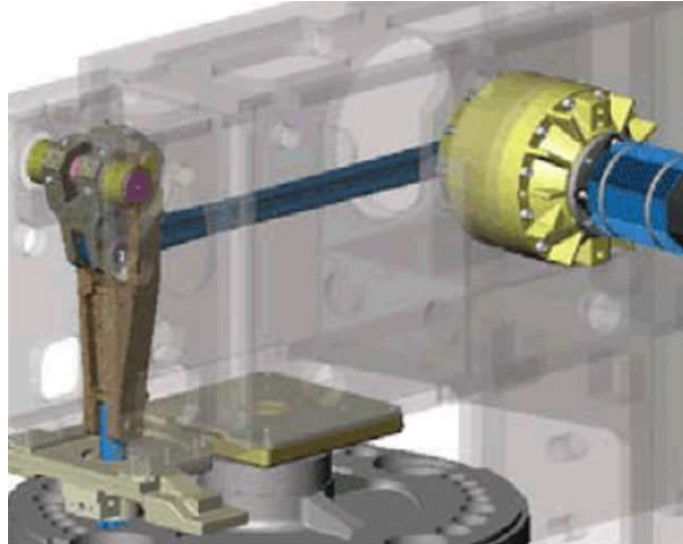


Figura 31 - Sistema de acionamento mecânico Accurl [18].

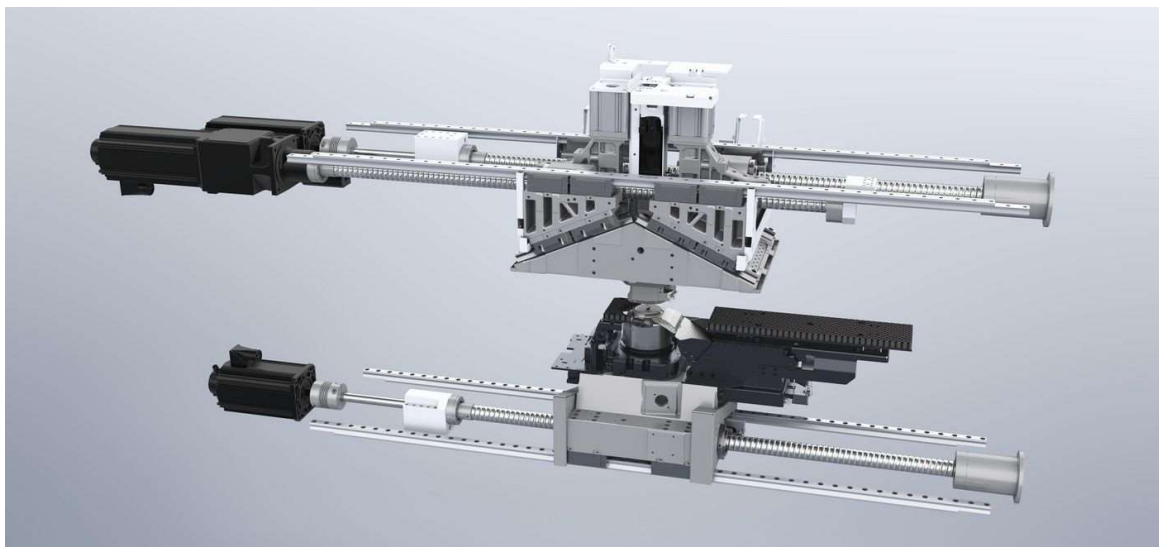


Figura 32 - Sistema Delta Drive da Trumpf [17].

Um outro sistema de acionamento mecânico é oferecido pela Trumpf, denominado por Delta Drive. Este sistema apresenta como factor diferenciador o facto de permitir que a cabeça da máquina se desloque no eixo dos YY. Para realizar os movimentos da ferramenta existem três servomotores, que vão fazer rodar fusos roscados, estes estão ligados a um mecanismo que se irá deslocar ao longo do eixo dos YY e principalmente no eixo dos ZZ de forma a movimentar a ferramenta. Este é um sistema mais complexo

e com um maior número de peças moveis relativamente aos restantes sistemas apresentados. A Figura 32 mostra o sistema completo [17].

Um outro sistema utilizado é o hidráulico. Neste os cilindros hidraulicos acionam diretamente o porta ferramentas dos punções, e os sistemas de rutação da cabeça de corte. E este é o sistema geramente utilizado nas ponçunadoras de cabea única, como é o caso da maioria das maquinas trumpf, mas tambem por outros fabricantes que disponibilisam caquinas dess tipo.

Por fim, existe um sistema de acionemento híbrido, que concilia um sistema hidráulico, com um mecânico. Neste sistema, que é fornecido pela marca EuroMac, (Figura 33), e denominado por *Flex Hybrid System*, é criada pressão por um cilindro hidráulico e postriormente acionado um exentrico por um servomotor que obriga um emblo a aumentar a pressão no sistema hidráulico, e dessa forma aciona a ferramenta [16].

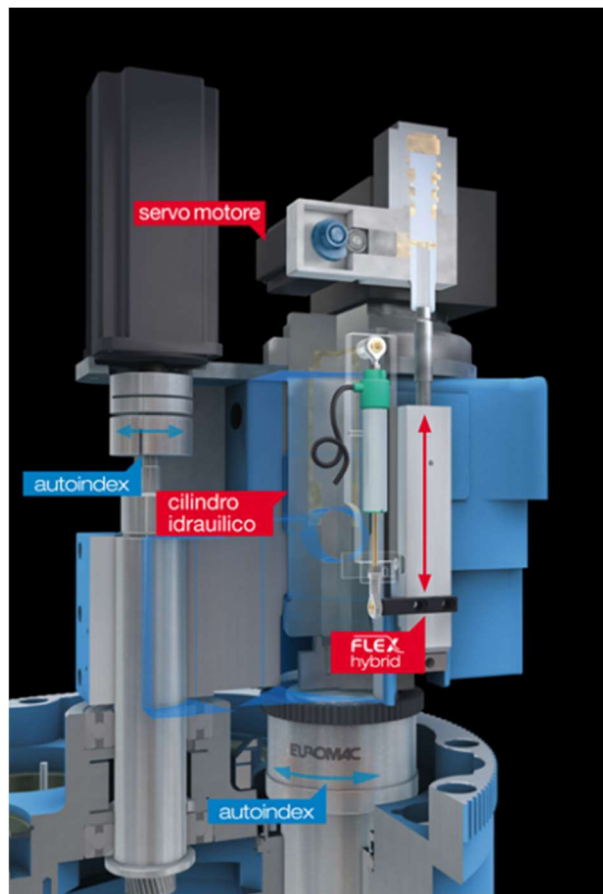


Figura 33 - Sistema da EuroMac Flex Hybrid System [16].

2.2.2.3 Sistemas de movimentação

A movimentação neste tipo de máquina pode ser sempre realizada de forma manual pelo operador, o que torna o equipamento muito mais barato na hora da compra. No entanto, esta opção irá tornar o trabalho muito mais lento e por consequência muito

menos produtivo. Para colmatar esse problema e para aumentar a produtividade, os vários fabricantes de máquinas punçadoras desenvolveram um conjunto de automatismos que permitem realizar todas as movimentações de forma automatizada e dispensado a intervenção humana ao longo de todo o processo.

Para simplificar a análise da movimentação, este capítulo vai ser dividido em três partes distintas. Serão elas a movimentação da matéria prima, ou seja, das chapas; da chapa durante as operações; e posteriormente, a remoção das peças e do esqueleto que resta das chapas que envolve as peças.

Numa primeira fase é necessário colocar as chapas sobre a mesa de trabalho. Para esse efeito os fabricantes recorrem a robôs, composto por um carrinho equipado com múltiplas ventosas, que vão segurar as chapas através de vácuo, e transportá-las uma a uma para cima da mesa de trabalho. O carrinho movimentasse ao longo de uma viga onde se encontra suspenso, esta viga é geralmente bem longa pois entre a armazém de chapa e a mesa de trabalho geralmente dispões do armazém para peças terminadas. Estes sistemas permitem de forma muito simples trabalhar com os mais variados formatos e dimensões de chapas. Exemplos destes tipos de equipamentos são os SheetMaster da Trumpf [17] Figura 34, e o MP SheetCAT da Amada [19].



Figura 34 - SheetMaster da Trumpf [17]

Estes equipamentos podem, por sua vez, ser acoplados a sistemas mais completos, por exemplo armazéns automáticos de chapa, permitindo assim trocar o lote de chapa a usar de forma também automática.

Depois da chapa se encontrar sobre a mesa de trabalho, e visto que na larga maioria das punçadoras a ferramenta está estática nos eixos XX e YY, é necessário movimentar a chapa para que cada um dos golpes seja realizado nas coordenadas certas. Esta

movimentação varia de fabricante para fabricante, apesar de geralmente este acionamento caber a servomotores. Alguns fabricantes optam por fazer que toda chapa deslize sobre a mesa de trabalho nas várias direções, diminuindo a massa que é preciso movimentar. Outros optam por fazer com que a chapa deslize sobre a mesa no eixo dos XX e YY o que requer o deslocamento da mesa, o que obriga a que seja necessária uma maior força para fazer a movimentação. Por exemplo, na punçoadora TruPunch 5000, para a deslocamento do eixo dos YY, toda a mesa é solidaria com a chapa e são utilizados dois servomotores, contra apenas um para o eixo dos XX. Mesmo assim, a máquina desloca-se mais rapidamente no eixo dos XX, que apenas desloca a régua onde estão as ferramentas a ser usadas e a chapa.

No entanto como a chapa se desloca sempre, esta tem que ser presa, para que não se percam as coordenadas estabelecidas no início de cada trabalho. Para tal os fabricantes utilizam sistemas de pinças, como o que se pode ver na Figura 35 do fabricantes EuroMac [16].

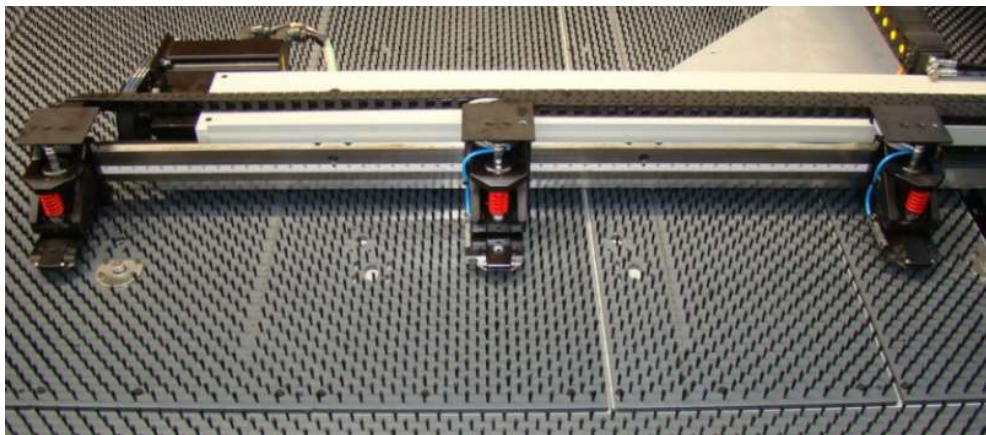


Figura 35 - Conjunto de pinças para prender a chapa da EuroMac [16].

Quando as peças ficam completamente cortadas, estas devem ser removidas caso fiquem completamente soltas. Em alternativa as peças podem ficar presas à chapa por pequenas ligações, e posteriormente ser feita a separação manual das peças após se retirar a chapa da mesa de trabalho. No caso de as peças ficarem soltas, existem várias propostas para a recolha das peças, e estas são muito variadas, pois variam de fabricante para fabricante e segundo o tamanho das peças a remover. Regra geral, para recolher pequenas peças são colocados alçapões nas mesas de trabalho, próximos da cabeça de corte. Estes abrem logo após o corte completo do perímetro da peça, permitindo o seu deslizamento para fora da mesa de trabalho, acabando por ser depositadas nos locais apropriados. Um exemplo de alçapão é o apresentado na Figura 36, do fabricante EuroMac.



Figura 36 - Alçapão para remoção de peças da mesa de trabalho numa punçoadora da EuroMac [16].

Para peças de maiores dimensões existem outros sistemas que, regra geral, recorrem a sistemas de vácuo. Geralmente, estes sistemas são os mesmos que realizam a deslocação das chapas em bruto, como é o caso do SheetMaster apresentado na Figura 34 e o equipamento UR-UL do fabricante Amada, apresentado na Figura 37.



Figura 37 – Equipamento Amada UR-UL [19].

Após terminar o corte de todas as peças, resta um esqueleto de chapa que também deve ser removida da mesa de trabalho. Por norma, os equipamentos destinados a estas funções apenas removem o esqueleto da mesa. No entanto, existem também equipamentos que retalham o esqueleto em pequenos fragmentos, como é o caso do ShearMaster da Trumpf, (Figura 38).

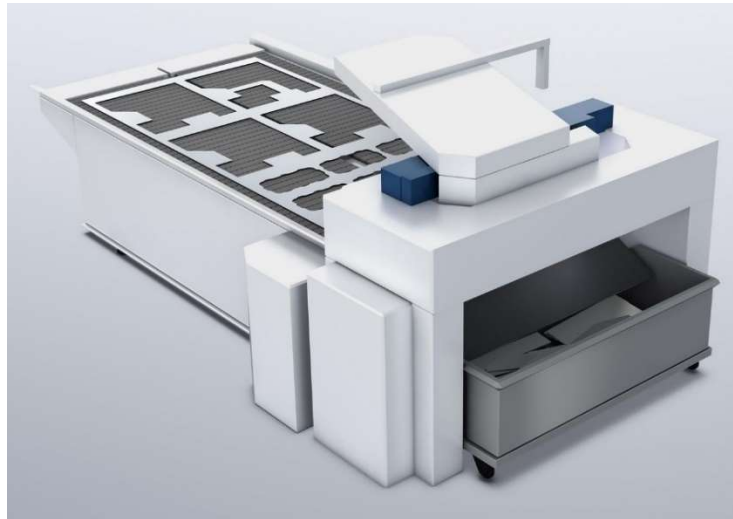


Figura 38 - ShearMaster, equipamento para remoção e fragmentação do esqueleto restante da chapa [17].

2.3 Ferramentas para corte e estampagem em punçoadora CNC

As ferramentas de corte e estampagem são compostas essencialmente por duas partes: o punção e a matriz. Caso sejam ferramentas de corte, o perímetro exterior do punção e o perímetro interior da matriz vão formar o gume de corte da ferramenta [12]. Caso sejam ferramentas de estampar, estes vão passar a sua forma à peça.

As ferramentas para punçoadora, segundo o seu tipo função, podem ser divididas em quatro grupos distintos:

- as ferramentas de corte;
- as de estampagem;
- ferramentas de granar;
- e operações especiais.



Figura 39 - Ferramentas de corte e os seus componentes, punção, serra-chapas e matriz [20].

As ferramentas de corte, por norma, são constituídas, para além do punção e da matriz, por um serra chapas (Figura 39), que durante a operação vai segurar a chapa em redor do corte por forma a que a chapa não sofra deformações não desejadas.

Assim o punção tem de ter a forma do furo que é pretendido, e a dimensão do mesmo.

O serra-chapas, que vai pressionar a chapa contra a matriz, deve ter uma forma idêntica, mas uma dimensão maior para que o punção possa passar sem qualquer interferência. O serra-chapas pode deter formas bastantes distintas, e pode ser fabricado em materiais bastante distintos, como ligas metálicas ou até elastômeros. Nestes casos ele é unido ao punção e torna-se solidário com este, como se pode ver na Figura 40.



Figura 40 - Punções com respetivos serra juntas de elastômero [21].

Já a matriz, obviamente tendo a mesma forma do punção, tem necessidade de ter folga entre a forma do punção e o seu orifício, mas a folga entre estes dois componentes vai depender do tipo de material a cortar e, ainda mais importante, da espessura da chapa a trabalhar [12], como mostra a Figura 41.

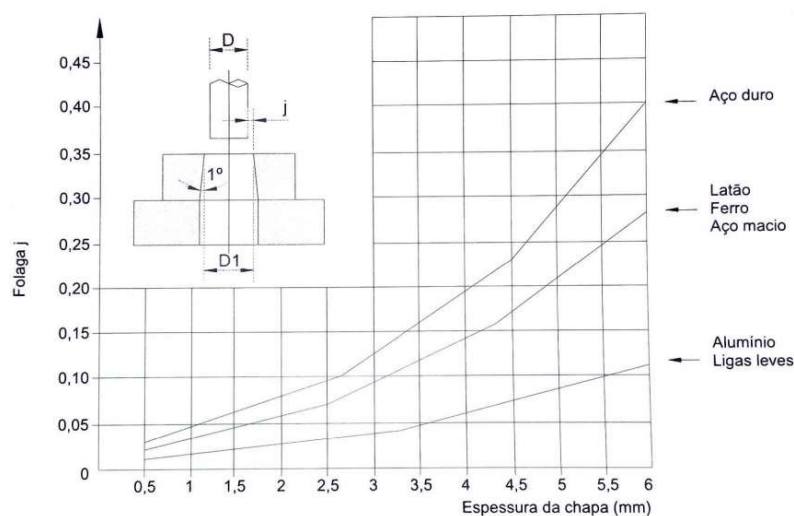


Figura 41 - Folga da matriz em função do material e da espessura da chapa [12].

No caso das ferramentas de estampagem, a matriz não vai ter orifício para a saída do desperdício, mas sim um molde da deformação que se pretende realizar. E o punção terá o negativo dessa mesma forma, assim, o punção pressionando a chapa contra a matriz, a forma destes será passada à chapa criando o embutido. Nestas ferramentas, a existência do serra chapas vai depender do modo de deformação a executar nessa estampagem.

Para deformação por extensão não existirá serra chapas, como se pode ver na Figura 42.



Figura 42 - Ferramenta para estampagem com ausência de serra chapas [22].

Já para estampagens com deformação por expansão, existirá serra chapas, como se pode ver na Figura 43.



Figura 43 - Ferramenta para estampagem com serra juntas [22].

Como se pode ver na Figura 43, a parte da ferramenta que vai moldar a chapa encontra-se rodeada por uma parte móvel que, quando pressionada pela força do punção, vai prender a chapa de modo a que, enquanto esta se molda, não deslize.

As ferramentas para granear têm como função apenas criar marcações na chapa.

Estas podem marcar apenas simples pontos, que sendo bem agrupados e bem organizados podem formar as formas específicas

Ou ferramentas que de um só golpe marcam a chapa já com a forma desejada, podendo essas marcas serem desde letras a símbolos de segurança, entre outros, Figura 44.



Figura 44 - Ferramenta de granear, símbolo elétrico de cabo de terra [23].

Existem vários tipos de ferramentas especiais, mas destacam-se os machos para execução de roscas. Os machos permitem que as roscas sejam realizadas nas peças, ainda na punçoadora, evitando assim que estas tenham necessidade de passar por mais um posto de trabalho.

Podem ser ainda destacadas as ferramentas para a realização de quinagens até 75 mm. No entanto, estas são ferramentas de uso exclusivo nas punçoadoras de cabeça única.

É também importante referir que, mediante o tipo de cabeça de corte, única ou de torreta, as ferramentas são bastante distintas. Isto deve-se aos sistemas de suporte e de acionamento serem distintos.

E como se pode ver na Figura 45, para a montagem de uma ferramenta para cabeça única, é necessário um conjunto de acessórios.

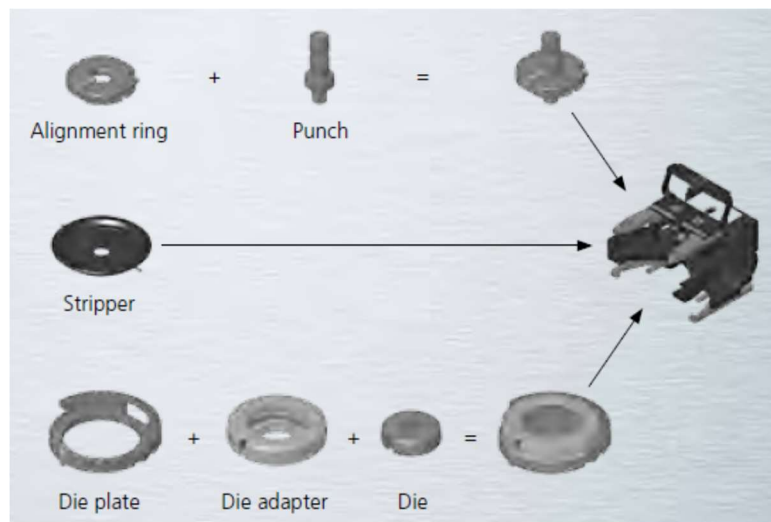


Figura 45 - Montagem de ferramenta da Trumpf, máquina de cabeça única [24].

A constituição de uma ferramenta de torreta é também ela complexa e composta igualmente por um conjunto de acessórios, tal como se pode verificar na Figura 46.

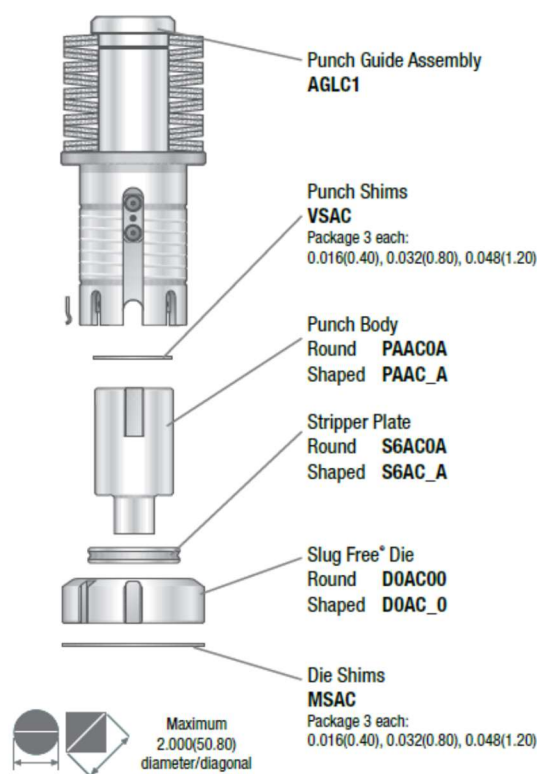


Figura 46 - Constituição exemplo de uma ferramenta de cabeça tipo torreta [25].

É ainda importante referir que na constituição da cabeça de corte por torreta são utilizadas em simultâneo, ferramentas de várias dimensões (Figura 47), e que estas não

são permutáveis de local na máquina, no entanto a constituição de cada ferramenta é idêntica.



Figura 47 – Ferramentas para punçadoras de torreta de diferentes dimensões da marca Amada [19].

2.4 Problemas e defeitos existentes em processos de corte e estampagem em punçadora CNC

Existem inúmeros tipos de defeitos e problemas que podem surgir no processo de corte e estampagem em punçadora CNC, que podem surgir da programação, do operador ou mesmo problemas na máquina.

O primeiro passo para o corte numa máquina CNC é sempre a programação, e logo aqui podem surgir problemas que darão origem a defeitos nas peças finais. O erro que mais facilmente pode acontecer é não aplicar a ferramenta correta para determinada geometria, ou não colocar qualquer ferramenta. Este tipo de erro pode pôr em causa a funcionalidade da peça, mas não acarreta qualquer perigo para a máquina e principalmente para o operador. No então, na programação podem surgir erros mais graves, como por exemplo programação errada da remoção de uma peça. De facto, a partir do momento em que uma peça fica separada do esqueleto da chapa, esta deve ser imediatamente removida da mesa, caso contrário, a peça pode sobrepor-se à chapa no local dos puncionamentos seguintes. Neste caso, uma ferramenta pode facilmente partir ou mesmo causar danos maiores na máquina. Uma peça solta pode também tornar-se num projétil perigoso para o operador, já que com as altas elevadas velocidades a que as mesas de trabalho se deslocam é possível que a peça seja projetada para fora da mesa de trabalho em várias direções, e no pior dos casos, na direção do operador ou qualquer outro funcionário.

Outro erro que pode surgir proveniente da programação é a colisão da cabeça de corte com embutidos criados em operações anteriores. Este problema pode ocorrer ao realizar um puncionamento próximo, esmagando o embutido anterior. Para evitar este

tipo de erros, todos os cortes próximos aos embutidos devem ser realizados antes de estes serem executados. Contudo, também nas movimentações entre cortes pode haver colisões.

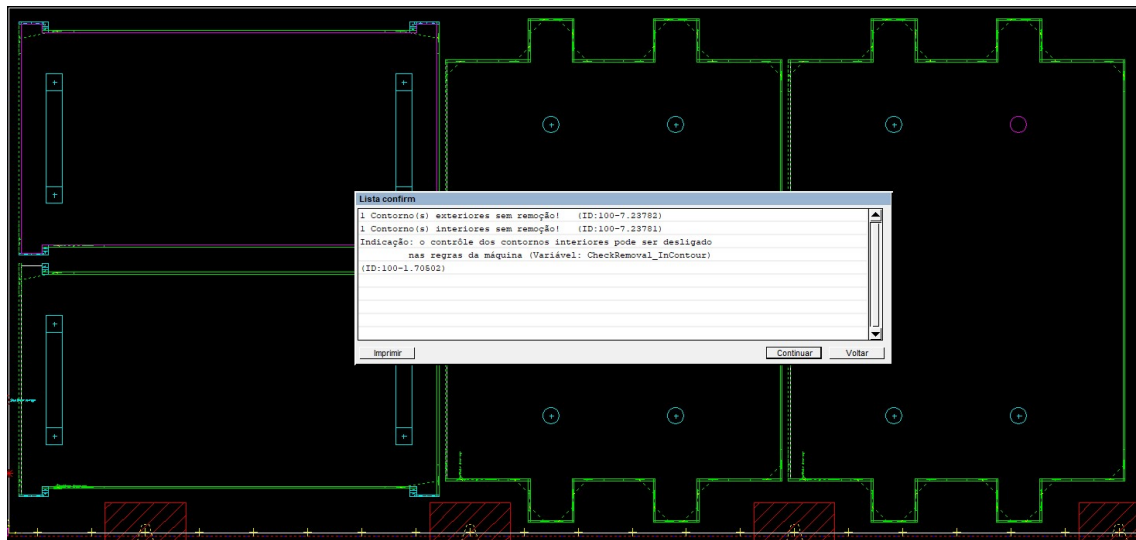


Figura 48 - Programa para punçoadora com defeitos e respectivos alertas (criação própria)

Para se evitar este tipo de erros, os criadores dos softwares de programação têm melhorado e acrescentado de ferramentas de simulação, que alertam para os erros anteriormente descritos, (Figura 48), e outros, como por exemplo uma peça que vai ser removida e ainda não se encontra completamente destacada do esqueleto restante.

Os operadores também podem causar erros, podendo ir desde problemas que apenas afetam a conformidade da peça, a erros que podem causar problemas ou mesmo avarias na máquina.



Figura 49 - Furo realizado por punçamentamento com rebarba (imagem própria).

Os erros na peça podem ser causados pela troca da posição de uma determinada ferramenta, com outra, ou mesmo a montagem de um par punção-matriz, diferente do correto, como por exemplo trocar um redondo por um quadrado. O operador pode

também equivocar-se na matriz e colocar a matriz com a geometria certa, mas colocar para a espessura de chapa errada. Neste caso, a geometria da peça vai estar correta mas podem aumentar as rebarbas na peça, ou irá gerar-se um maior desgaste na ferramenta, o que levará por sua vez à origem de rebarbas quando a ferramenta se encontrar desgastada, (Figura 49).

Um dos erros que pode surgir por parte do operador, é selecionar erroneamente o par punção-matriz colocando uma matriz com um orifício em que o punção é maior, levando a que, a matriz e o punção se abalroem fazendo com que estes partam e que outros danos sejam causados à máquina, como por exemplo a perda de paralelismos e centralidade da cabeça de corte com o porta matriz.

O desalinhamento entre a cabeça de corte e o porta-matriz nem sempre surge com choques como anteriormente descrito, nesse caso ele é facilmente detetado. Nos casos em que ele surge gradualmente, este pode causar sérios problemas na qualidade e exatidão do corte. Para a prevenção deste tipo de problemas é essencial uma manutenção preventiva e cuidada dos equipamentos.

2.5 Simulação numérica de corte e estampagem

A evolução constante existente na indústria nos tempos correntes e a constante falta de tempo, conjugada por um aumento da complexidade dos produtos criados nas mais diversas áreas de trabalhos, levou à necessidade de se encontrar métodos mais expeditos e económicos para realizar os estudos indispensáveis para a criação dos produtos pretendidos. Tal levou a que, em 1943, surgissem, pelas mãos de Courant, as primeiras bases para aquilo que hoje se conhece como Método de Elementos Finitos (MEF), ou em inglês *Finite Element Method* (FEM) [26]. Tendo sofrido evolução desde então, mas como para a resolução destes problemas se requerem a solução de operações com matrizes de grandes dimensões, o FEM viu a sua utilização alargada a par da evolução da capacidade de cálculo dos computadores. Foi o programa Nastran, na década de 60, o primeiro software deste tipo a ser largamente utilizado. Existem hoje múltiplos programas que utilizam este método para ajudar a resolver os problemas que vão surgindo em cada projeto. Programas como o SolidWorks, Creo e Inventor tem já incluídos módulos para a realização destes estudos. No entanto, programas como o Ansys, Algor, Cosmos/M e o Abaqus são totalmente dedicados ao processamento deste método, tornando-os assim mais completos e rigorosos.

Para a utilização deste método é preciso conhecer muito bem os materiais a ser usados, pois este passo é vital para uma simulação correta visto que é, através destes dados e dividindo as partes em inúmeros elementos de pequena dimensão, que os complexos cálculos informáticos se vão realizar.

O tipo de problemas que é possível resolver com o recurso ao MEF é vasto e vai desde análise de tensões e térmicas a componentes metálicos como análises de comportamento de fluidos, ou de ondas eletromagnéticas.

Para que as simulações numéricas possam decorrer de forma correta e os resultados sejam validos, é de todo vital um grande conhecimento da forma como se vai desenvolver o caso a estudar, e também as características dos materiais que vão ser empregues em cada um dos componentes envolvidos.

No que ao corte e estampagem diz respeito é de todo necessário saber as formas dos punções de das matrizes, e como vai decorrer o corte tal como a velocidade e as condições de contacto entre cada uma das partes: punção-chapa e chapa-matriz.

Mas é sobretudo necessário conhecer em profundidade o material a cortar. Para tal é vital conhecer cada uma das fases de deformação do material e, como tal, conhecer bem o diagrama das tensões/deformações, e com isso é possível então definir a fase elástica e plástica. Outras características como a densidade é também vital conhecer. Mas no caso do corte como o material vai sofrer rotura, ou seja vai sofrer danos, é também vital o conhecimento deste com grande rigor.

O processo de dano de um material é um processo complexo e no qual existem muitas variáveis envolvidas. Mas como parâmetro vital que é, com o passar dos tempos, foram surgindo vários modelos para a sua definição, dos quais se podem destacar os modelos propostos por Gurson, Tvergaard and Needleman (GNT), por Cockcroft-Latham sendo que este também conta com modelos modificados, por Bao-Wierzbicki, e também por Johnson-Cook (J-C) [27].

Sendo um dos modelos mais utilizados, neste capítulo vai ser analisada a forma de conseguir os parâmetros para a utilização do modelo J-C. Para tal é usada a equação (12)

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2^{(D_3(P/\sigma_y))})(1 + D_4 \ln \varepsilon^*)(1 + D_5 T^*), \quad (12)$$

onde P/σ_y é o parametro que representa a triaxialidade da tensão, e ε^* é a deformação. As constantes D_1 a D_5 são parâmetros dos materiais e são obtidos a partir dados experimentais [28].

O primeiro bloco da expressão (13) representa o efeito da tensão hidrostático na fratura por fadiga em condições quase estáticas

$$\varepsilon_{hydro} = (D_1 + D_2^{(D_3(P/\sigma_y))}). \quad (13)$$

E, como anteriormente referido, P/σ_y é referente ao parametro de triaxialidade da tensão D_1 , D_2 e D_3 são parâmetros obtidos a partir de ensios quase estaticos e onde D_3 não pode assumir valores negativos.

No segundo bloco (14), é referente ao efeito da taxa de deformação na tensão para a rotura.

$$\varepsilon_{strainR} = (1 + D_4 \ln(\varepsilon^*)) \quad (14)$$

Para este termo o efeito da taxa de deformação é isolado da temperatura.

No terceiro e último bloco da expressão (15), é analisado o efeito da temperatura para a rotura do material.

$$\varepsilon_{temp} = (1 + D_5 T^*) \quad (15)$$

Outro parâmetro de grande importância no MEF é a malha. Esta é o conjunto de elementos e nós que compõem cada um dos componentes a ser estudados pois a definição da precisão dos resultados vai também depender diretamente do refinamento da malha. Quanto maior o número de elementos e nós maior será a precisão dos resultados. No entanto, quanto mais elementos, mais pesado e demorado se torna o correr da simulação, assim como a densidade da malha pode variar de região para região de uma mesma peça, deve-se ajustar a malha de forma a que esta se ajuste da melhor maneira à forma geométrica da peça. Para tal, nas regiões onde existem pormenores importantes na peça a malha deve ter maior densidade, para melhor representação dos fenómenos que aí ocorrem.

Aquando do estudo de roturas, a região onde se prevê que esta ocorra deve também ter um bom refinamento da malha, para uma boa compreensão do fenómeno e obtenção de bons resultados e não raras ocasiões as roturas ocorrem, em regiões com geometrias mais complexas, que também por essa razão devem ter malhas mais densas. A densidade da malha para além de uma melhor precisão das tensões influencia também substancialmente os resultados da deformação.

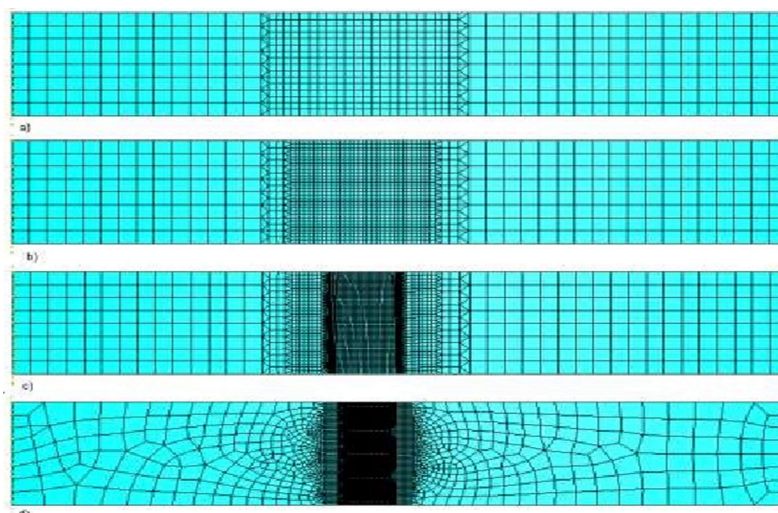


Figura 50 - Estudo de refinamento da malha por Soderberg [29]

Num trabalho realizado por Magnus Soderberg em 2006 onde estudou, entre outras coisas, o refinamento de malhas, e a forma como esta influência a força resultante assim como o percurso que o corte em si vai percorrer [29]. E este realizando várias experiências e comparando análises numéricas, com ensaios físicos, concluiu que para uma correta análise numérica, o local por onde vai ocorrer deve ser composto por pelo menos 64 elementos e no máximo 128, e desta forma obtém-se o trajeto correto e o um valor mais real da força.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caraterização da empresa que acolheu o projeto

Este projeto foi realizado em parceria com a empresa CARADONNA® - Assemblagem de Cofres Fortes, Lda, sendo que esta é uma subsidiária da empresa Francesa Société Française des Coffres-Forts CARADONNA® (SFC CARADONNA), tendo sido esta fundada em 1965 pelo senhor Jean Caradonna.

A CARADONNA®, é atualmente líder no mercado francês e internacional, em soluções de segurança física, para cofres e proteções de caixas multibanco (ATM's), no que ao mercado da banca e retalho diz respeito [30].

A evolução constante dos seus produtos, comprovado pelos seus cofres especialmente adaptados na resistência contra explosivos pastosos e com gasosos, e os critérios de qualidade que lhes permite serem certificados por diversas entidades de certificação de equipamentos de segurança física. Estes fatores permitem que a empresa conte com mais de 1750 clientes, espalhados por 72 países dos continentes europeu e asiático. De entre alguns dos clientes destacam-se alguns dos mais importantes bancos franceses e mundiais, e grandes construtores de ATM's.

A melhoria da produtividade e condições de trabalho dos seus colaboradores são também uma preocupação diária da direção, e isto reflete-se na qualidade e quantidade de equipamentos que a empresa detém ao seu dispor, tanto no polo francês como no polo existente em Portugal, mais precisamente na zona industrial do conselho do Marco de Canavezes. Este último, pois este tem crescido a bom ritmo, tem início de funções em 2002 com apenas um pavilhão de 500 m², e como um polo de assemblagem, e hoje é composto por três pavilhões que correspondem a uma área coberta de 12000 m², onde são fabricados desde o início ao fim mais de 14000 cofres, e outros equipamentos, ao ano [31].

O polo português, tendo os três referidos pavilhões, encontra-se organizado do seguinte modo:

No primeiro e maior pavilhão encontram-se todos os equipamentos de corte que a empresa dispõe, destacando-se o laser de corte de chapa modelo TruLaser 3030 equipado com assessórios que o permitem ser completamente autónomo, e as duas punçadoras TruPunch 5000, também estas com diversos equipamentos de auxílio aos

operadores. Existe também uma fresadora CNC Haas, uma perfiladora, e também quatro quinadoras.

Neste pavilhão são ainda assemblados parte dos produtos e, para o efeito, a empresa dispõe de três robots de soldadura.

No segundo e mais pequeno pavilhão são apenas assemblados os restantes componentes dos cofres.

Por fim, no último pavilhão, os cofres e restantes produtos recebem os acabamentos, e para tal a empresa dispõe de uma granalhadora, e uma estufa de pintura.

Neste último pavilhão são ainda montados todos os acessórios eletrónicos e mecânicos escolhidos pelos clientes. Na Figura 51 pode-se ver alguns dos equipamentos existentes no primeiro pavilhão e as bancadas onde são realizadas as últimas tarefas de montagem e a inspeção final aos cofres.



Figura 51 - Fotos de parte dos equipamentos ao dispor da empresa CARADONNA® [30].

3.2 Caracterização dos componentes a fabricar

Os cofres e restantes equipamentos fabricados na CARADONNA®, (Figura 52 e Figura 53) são compostos por dezenas ou até mesmo centenas de componentes. Mediante as características de cada um deles, o gabinete de projeto define os processos de fabrico a utilizar para cada uma das peças. Para as peças com origem em chapa, pode definir-se que estas serão cortadas no laser, ou cortadas no laser e depois maquinadas na CNC. Ou então no caso de terem embutidos, ou o acabamento da parede de corte não serem tão exigente, as peças serão cortadas nas punçadoras.



Figura 52 - Cofre Star III/IV da gama standard da CARADONNA® [30].

Esta dissertação foca-se no processo de corte que ocorre nas punçadoras TruPunch 5000. As características das mesmas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características das punçadoras existentes na empresa Caradonna [17].

Trumpf TruPunch 5000	
Força de puncionamento máxima.	220 kN
Punção do eixo X	3050 mm
Punção do eixo Y	1550 mm
Espessura máxima da chapa	8,0 mm
Consumo médio de potência na produção	9,5 kW



Figura 53 - Armário de compartimentos do catálogo da CARADONNA® [30].

O processo de corte por puncionamento é essencialmente utilizado, como já referido, para o corte de peças com embutidos, e nas peças de maior dimensão, de entre aquelas que são fabricadas nesta empresa. Pois no fabrico de peças de pequena dimensão, a percentagem de material desperdiçado torna-se grande, e diminui a produtividade.

Pois este processo demonstra uma maior produtividade quando utilizado no fabrico de peças de maior dimensão e especialmente se estas tiverem muita furação.

3.3 Caraterização do material

Para a realização desta dissertação foi utilizado o material que é maioritariamente empregado na empresa Caradonna, o aço DD1. Este material representa cerca de 90% do material cortado nas punçadoras, cabendo os restantes 10% ao aço inoxidável 304.

O aço DD11 é um aço laminado a quente, para ser empregue em estampagem e quinagem a frio, com especial utilização na indústria automóvel, em mobiliário metálico, painéis de máquinas e grandes eletrodomésticos. E este é regulado pela norma EN 10111 [32].

Na Tabela 3 é apresentada a composição química do aço, mostrando os teores máximos de cada um dos seus elementos.

Tabela 3: Teores máximos dos elementos constituintes do aço DD11 [32].

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0,12	0,6	0,045	0,045

Para este tipo de aço, em ensaio de tração, são esperadas as características mecânicas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características espectáveis para ensaio de tração [32].

Tensão de cedência:	ReL = 170-360 N/mm ²
Tensão de rotura:	Rm = 440 N/mm ²
Alongamento após rotura:	A = 23%

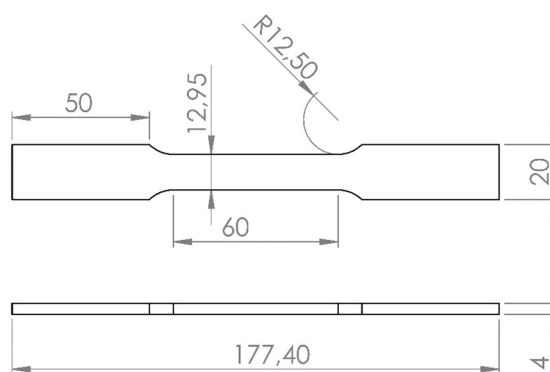


Figura 54 - Dimensões dos provetes utilizados para os ensaios de tração, criação própria.

Para a realização do trabalho foram executados dez ensaios de tração para a obtenção de propriedades mecânicas do aço DD11. Para tal foram cortados vários provetes de distintas chapas, estes foram cortados pelo laser existente na empresa Caradonna, e juntamente com peças que se destinavam à produção. Os provetes foram cortados respeitando as normas do ensaio de tração ASTM E8-E8M – 09. A Figura 54 mostra as dimensões utilizadas dos provetes utilizados.



Figura 55 - Exemplo de provete utilizado nos ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados nas instalações do ISEP. Recorrendo à máquina de ensaios Shimadzu. Foram realizados ensaios em 10 provetes, sendo possível ver-se um dos exemplares utilizado na Figura 55.



Figura 56 - Provette preparado para a realização do ensaio de tração com o extensômetro.

Todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de 2 mm/minuto. E para uma maior precisão na medição dos deslocamentos, principalmente na fase elástica, foi utilizado um extensômetro, como se pode ver na Figura 56.

Na Figura 57 pode visualizar-se todos os provetes após a realização dos ensaios.



Figura 57 - Provetes após a realização dos ensaios de tração.

A Figura 58 mostra o gráfico com as tensões e os respectivos deslocamentos, obtido para cada um dos dez ensaios realizados.

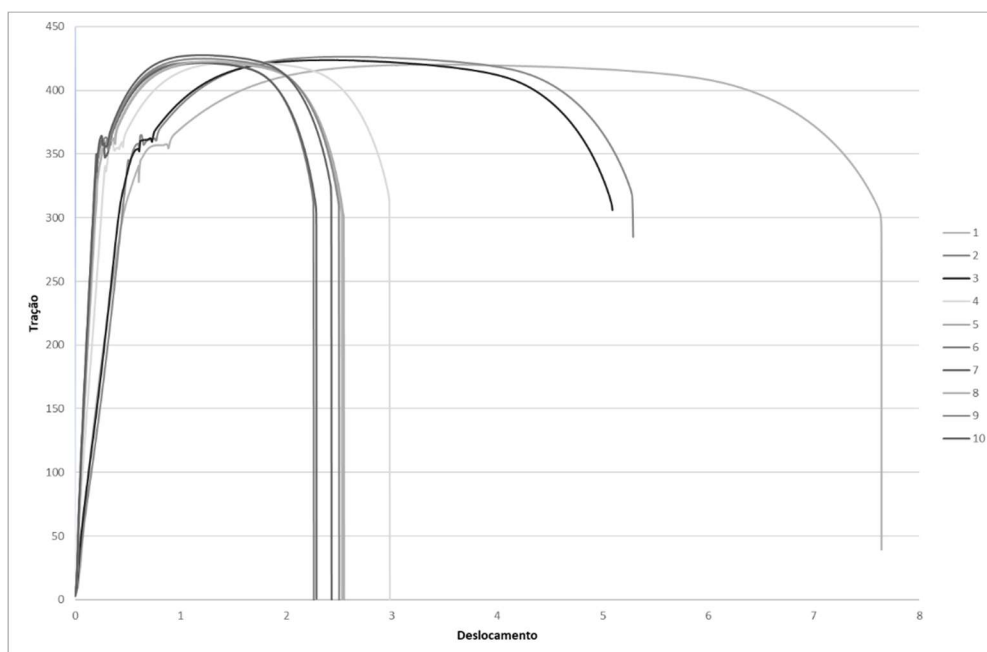


Figura 58 - Gráfico dos ensaios de tração deslocamentos dos ensaios de tração realizados.

Visualizando o gráfico verifica-se que três dos ensaios não podem ser considerados válidos. Pois estes apresentam um módulo de Young mais baixo que os restantes e que o esperado.

Para os restantes sete ensaios realizados foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas a partir dos ensaios de Tração.

Provete	Força máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão limite elástico (N/mm ²)	Tensão Máxima (N/mm ²)	Patamar de cedência (N/mm ²)	Módulo de Young (N/mm ²)
4	21944,71	5,96	334,56	422,01	360,15	205000
5	21930,76	5,10	307,95	421,75	360,33	209000
6	21945,81	4,53	323,13	422,03	359,37	209500
7	21921,76	4,58	328,75	421,57	360,93	210000
8	21974,91	5,06	314,31	422,59	360,22	209900
9	22094,76	5,01	335,88	424,90	363,08	208000
10	22240,38	4,86	343,11	427,70	363,76	210000
Média	21945,81	5,01	328,75	422,03	360,33	209500
Desvio. Padrão	109,48	0,44	11,57	2,11	1,53	1677

3.4 Condições da análise numérica realizada

As análises numéricas realizadas no âmbito desta dissertação foram realizadas com recurso ao software SIMULIA Abaqus. Este é um programa de calculo numérico, que utiliza o método de elementos finitos, para a realização de simulações, estas podem ser análises, de diversas naturezas, como análises da influência térmica, eletromagnéticas e estruturais. Este software é propriedade da empresa francesa, dassault systemes.

E este é composto por vários módulos para as distintas operações e análises a executar. Como base apresenta o Abaqus/CAE, que é uma interface dividida em módulos permite criar, editar, monitorizar, diagnosticar e visualizar as análises numéricas.

Outros dos elementos existentes são o Abaqus/Standard, destinado à realização de ensaios em condições estáticas, e o Abacus/Explicit, sendo este reservado à realização de ensaios dinâmicos.

Nesta dissertação foram utilizados os três elementos referidos:

- o Abaqus/CAE na criação, monitorização, e análise de cada um dos ensaios numéricas realizadas;
- o módulo Abaqus/Standard para as análises onde apenas existem deformações;
- o módulo Abaqus/Explicit nas análises onde se pretende analisar o corte.

Na criação das análises o software apresenta a interface mostrada na Figura 59.

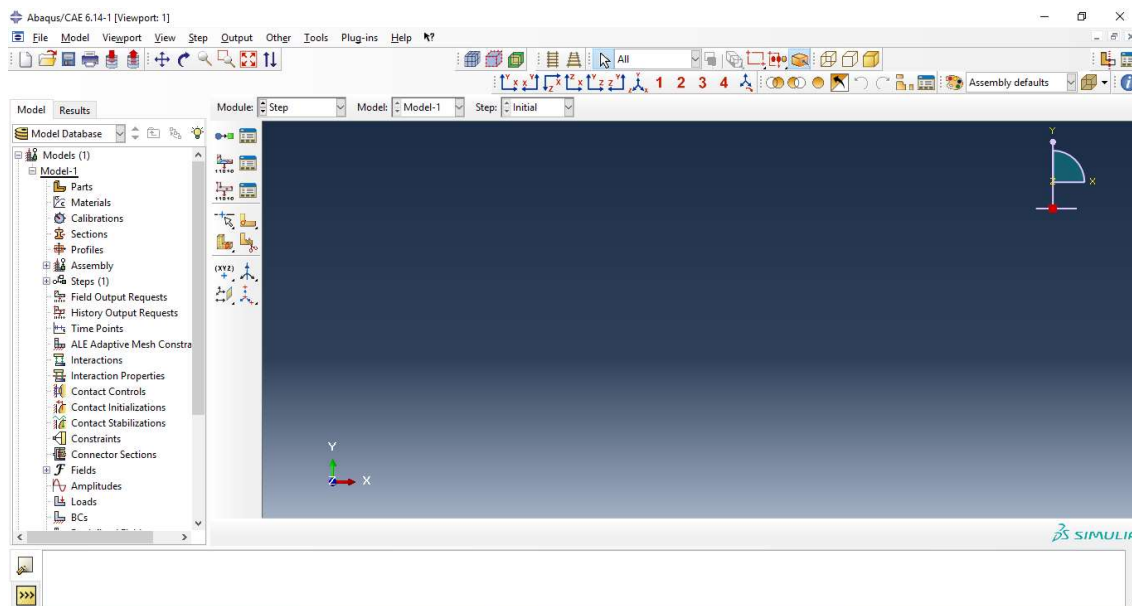


Figura 59 - Interface do software Simula Abaqus/CAE.

Nesta interface gráfica é necessário definir vários parâmetros em cada um dos sete módulos, para a realização das análises numéricas. São eles:

- *Part* – Neste módulo é onde são criados e/ou trabalhados cada um dos corpos envolvidos na análise numérica a executar. No caso desta dissertação tratam-se dos punções, matrizes e o provete de chapa a ser estampado ou cortado;
- *Property* – Este módulo é destinado à atribuição das propriedades mecânicas de cada corpo envolvido na análise;
- *Assembly* – Neste módulo é onde se monta o conjunto das partes na posição inicial da análise;
- *Step* – Este módulo é destinado a determinar o tipo de análise a realizar, se é uma análise estática ou dinâmica;
- *Interaction* – Este módulo é onde se determinam as propriedades existentes na interação entre os corpos existentes na análise numérica;
- *Load* – É o módulo onde se indicam as forças exteriores envolvidas no conjunto;
- *Mesh* – Neste módulo são definidas as malhas de cada um dos corpos.

Após a caracterização de cada um dos módulos e a execução da análise numérica, são obtidos os resultados pretendidos, das análises realizadas, que no caso desta dissertação consistiram nos deslocamentos dos punções, e nas reações que ocorrem nas matrizes.

Como já referido nesta dissertação foram executadas análises de caráter estático e dinâmico. Sendo que para a realização de cada um dos tipos é necessário definir alguns

parâmetros distintos, assim sendo são apresentados os parâmetros para cada tipo nos seguintes subcapítulos.

3.4.1 Análise estática

A análise estática, como já referido anteriormente, é utilizada para a análise dos golpes em que a punçoadora apenas realiza estampagem e não corte. Nestes processos a velocidade de trabalho das punçoadoras é mais lenta, e não existe rotura por parte do material. Daí ser esta a melhor opção de análise, devido ao facto de neste tipo de ensaio as velocidades exercidas serem baixas.

Para a caracterização destes processos, o primeiro passo foi criar os punções e as matrizes num software de desenho assistido por computador (SolidWorks), exportando os ficheiros no formato Step. Sendo depois importados, para o software SIMULIA Abaqus, como sólidos não deformáveis. Para que possam ser inseridos no conjunto assembled, os corpos têm de ser convertidos em cascas, como demonstra a Figura 60. No separador *part* é ainda definido um ponto referencial em cada um dos punções e matrizes.

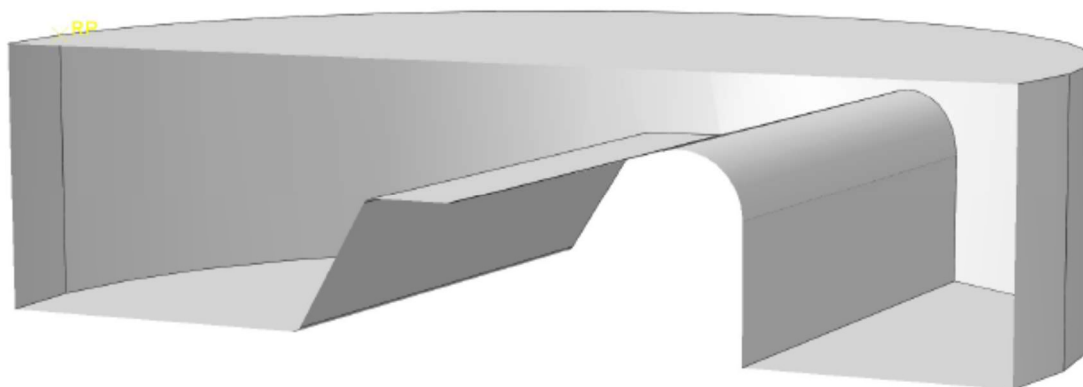


Figura 60 - Corpo de punção convertido em casca com o ponto de referência.

No caso do corpo representativo do provete de chapa, a criação é realizada diretamente no software Abaqus, como sendo um corpo deformável.

No separador *property*, apenas se caracteriza o provete de chapa, visto que apenas este é deformável, visto que as matrizes e punções são considerados não deformáveis. Tal consideração é possível tendo em conta a muito superior dureza do aço utilizado para o fabrico destes em relação ao aço a ser trabalhado.

Assim sendo, para a caracterização das propriedades da chapa são inseridas as propriedades plásticas e elásticas obtidas nos ensaios de tração previamente realizados. A densidade do material, que como se trata de um aço, é de $7,89 \text{ kg/dm}^3$.

Para as propriedades elásticas é indicado o módulo de Young (E), 210 GPa, e coeficiente de Poisson, 0,33, como estes se tratam de valores constantes característicos dos aços, e

os valores obtidos experimentalmente confirmam estes valores teóricos. Na dissertação foram utilizados os valores padrão.

Para as propriedades plásticas são indicadas a tensão de cedência e a tensão de rotura, obtidas experimentalmente nos ensaios realizados. Ou seja, 360 N/mm² e 422 N/mm², respetivamente.

De seguida, no módulo *assembly*, são colocados os três corpos, provete de chapa, matriz e punção, nas suas respetivas posições. A matriz é colocada na base do conjunto e o punção na parte superior, devidamente alinhados e com o provete de chapa entre ambos, como demonstra a Figura 61.

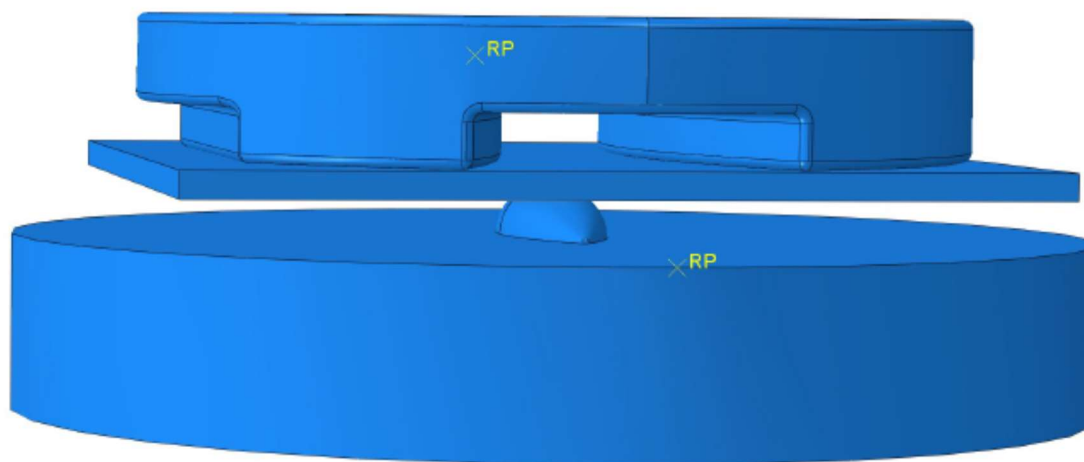


Figura 61 – Assemblagem do punção, matriz e provete para a criação de uma nervura.

No módulo *Step* é indicado o tipo de análise a realizar, que se trata de uma análise estática geral. neste mesmo separador é indicado que os parâmetros a analisar são os deslocamentos do punção, em concreto do deslocamento do respetivo ponto de referência. Tal como as forças de reação exercidas na matriz, e de igual modo, neste caso também se considera que todas as forças se encontram concentradas no ponto de referência.

No separador *interaction*, indicam-se as superfícies que irão exercer contacto entre si. Para que as superfícies não se ultrapassem mutuamente e interajam entre si.

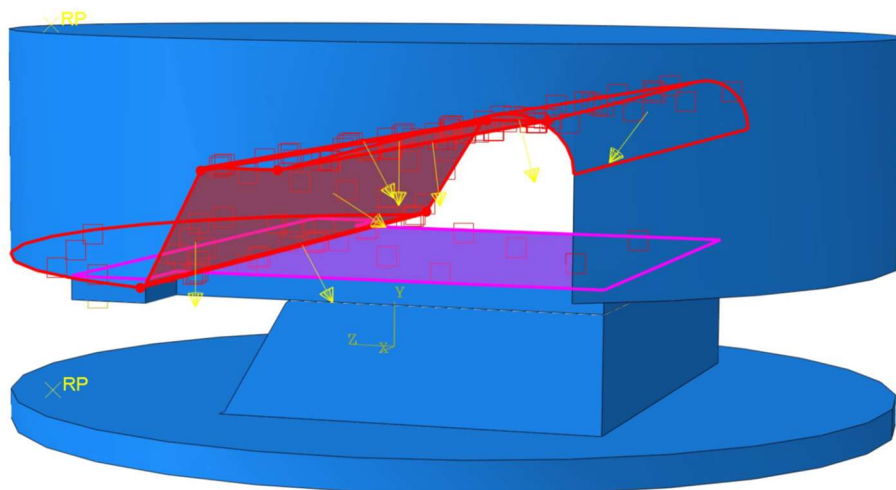


Figura 62 - Caracterização do contacto entre punção e a chapa, na análise do degrau.

Como as matrizes e punções são apenas de cascas é necessário indicar qual a face que está em contacto com a chapa, se a interior ou exterior, como se pode ver pela Figura 62. Onde as setas visíveis indicam que é a parte exterior da casca do punção que está em contacto com a chapa.

Para simplificar as análises, considera-se que não existe fricção entre as várias superfícies em contacto.

No separador *Load* indica-se que a matriz está encastrada de forma a que esta não se mova em qualquer sentido, e de igual modo também são encastrados os rebordos da chapa que não se movem a quando da realização do trabalho, neste caso com o objetivo de simular o efeito criado pelo serra-chapas (Figura 63).

Ainda neste separador é indicado o deslocamento que vai ocorrer no punção.

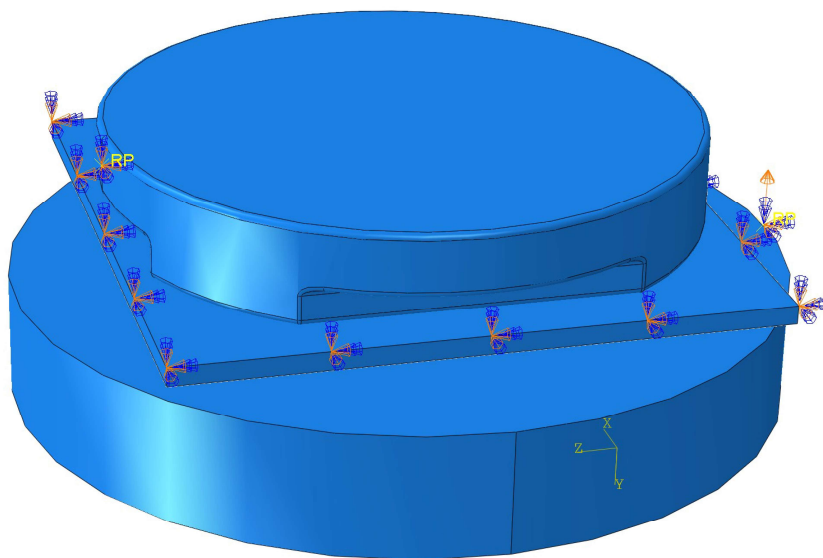


Figura 63 - Encastramentos e forças exteriores aplicadas no módulo *Load*, na análise da nervura.

No separador *mesh*, como já referido é necessário caracterizar as malhas de cada um dos componentes, e desse modo caracterizar o tipo de malha e o seu refinamento.

E para uma análise mais detalhada e não demasiado pesada, procura-se refinar mais a malha em locais específicos, como é o caso dos pontos que irão sofrer deformação nos extratos da chapa, e as formas mais complexas dos punções e matrizes, deixando uma malha mais grosseira nos restantes pontos.

3.4.2 Análise dinâmica

A análise dinâmica, como já mencionado, é utilizada na análise dos golpes onde a punçoadora realiza o corte da chapa. Esta operação é realizada a velocidades bastante elevadas e, como tal, a componente dinâmica é de grande relevância para um correto estudo do processo.

Tal como nas restantes análises para a execução destas, as representações dos punções e das matrizes foram importadas em Step para o programa. SIMULIA Abaqus, pois estes haviam sido criados, noutra programa de desenho assistido por computador.

No entanto, neste caso os componentes, punções e matrizes, foram importados como corpos deformáveis. Os punções após a importação é criado um Set da sua superfície, e esta é caracterizada como um material não deformável. No caso das matrizes, não sofrem qualquer tratamento no separados *Part*, continuando com todas as características que chegam do *Step*.

Tal como nas simulações estáticas, o provete de chapa é criado diretamente no software SIMULIA Abaqus. Porém, para que a análise não se torne demasiado pesada apenas é criado um provete para metade da ferramenta de corte, continuando este a se tratar de um corpo deformável.

Ao contrário da análise estática, onde punções e matrizes se tratam apenas de cascas, e por essa razão apenas a chapa precisa de ter o seu material caracterizado. Na análise dinâmica todos os corpos têm obrigatoriamente de ter pelo menos a sua densidade definida para que seja possível realizar a análise. Por essa mesma razão, é então impossível considerar qualquer corpo indeformável, já que, para serem corpos indeformáveis teriam novamente que ser cascas, e nestas não é possível atribuir uma densidade.

Como tal, e como para o punção é então criada apenas uma superfície indeformável no separador *part*, no módulo *property* apenas é necessário indicar a sua densidade, ou seja, a mesma que será utilizada para os restantes componentes, pois todos eles são fabricados de aço. Esta é uma característica partilhada por todos os tipos de aço: 7,89 kg/dm³.

Para a matriz não é possível utilizar o mesmo processo, pois dessa forma não é possível obter as reações, inforção que se pretende das análises realizadas. Para que tal seja então possível, e para que a matriz não se deforme ao longo da análise, as matrizes são caracterizadas como se tratassem de um corpo puramente elástico, mas com um coeficiente de elasticidade consideravelmente mais elevado que o aço, 100 vezes superior, e mantendo a densidade de 7,89 kg/dm³.

Para o provete de chapa a utilizar no ensaio, para além da densidade, das propriedades elásticas e plásticas, que são as mesmas utilizadas nos ensaios estáticos, é necessário introduzir o parâmetro de dano.

Para a realização desta dissertação optou-se pela utilização do critério de J-C, tendo em conta que este se trata de um dos mais utilizados critérios de rutura para este tipo de análise. No entanto a grande complexidade e quantidade de ensaios a realizar para a obtenção destes parâmetros experimentalmente, tornou impossível a sua obtenção dessa forma, que seria a mais correta. Devido a essa impossibilidade partiu-se para bibliografia em busca dos parâmetros, o que se revelou um outro problema. A quantidade de dados existentes é diminuta, de tal forma que os apenas foram encontrados os parâmetros dos aços apresentados na Tabela 6. E como se pode ver, o aço DD11 não consta na tabela. Assim sendo optou-se pelo aço C45, pois é dos aços apresentados o que dispõe de características mais idênticas ao aço DD11.

Tabela 6 - Parâmetros de dano segundo o critério de J-C, adaptada de [33]

Material	D ₁	D ₂	D ₃	D ₃	D ₄
C7	-0,80	2,10	-0,50	0,00	0,61
C45	0,04	1,03	1,39	0,00	0,46
34CrNiMo8	0,05	3,44	-2,12	0,00	0,61

No separador *assembly* o trabalho a fazer é de todo idêntico ao realizado na análise estática. Apenas se alinhou a matriz com o punção e se colocou o extrato de chapa entre ambos.

No separador *step*, para além de indicar que se trata de uma análise dinâmica, é essencial indicar o período de tempo em que a análise decorre. Pois tendo em conta a velocidade que será atribuída ao punção acaba por determinar o deslocamento que será executado pelo punção durante a realização da análise, e tendo em conta a elevadas velocidades e os pequenos deslocamentos pretendidos, apenas fações de segundo são suficientes para a realização do estudo.

É também necessário, tal como na análise estática, indicar que se pretende o deslocamento do punção, mas neste caso como não existe o ponto de referencia, é utilizada toda a face que estará em contacto com a chapa. No caso da matriz a reação é obtida utilizando toda a base da mesma.

No separador *interaction* como o punção perfurava a chapa, a interação entre estes não se pode resumir às suas superfícies. Neste caso, a superfície do punção tem de interagir com toda a espessura da chapa, e para isso a superfície do punção interage com todos os nós existentes na malha da chapa. A mesma interação foi criada entre a chapa e a matriz. Na Figura 64, podem-se ver pequenos quadrados nos corpos que indicam os pontos que interagem entre si, e como se pode verificar, no caso da chapa existem elementos em toda a sua espessura, e não apenas nas suas superfícies, como no caso da matriz e do punção.

E como nas análises estáticas para simplificar a análise a interação é livre de fricção.

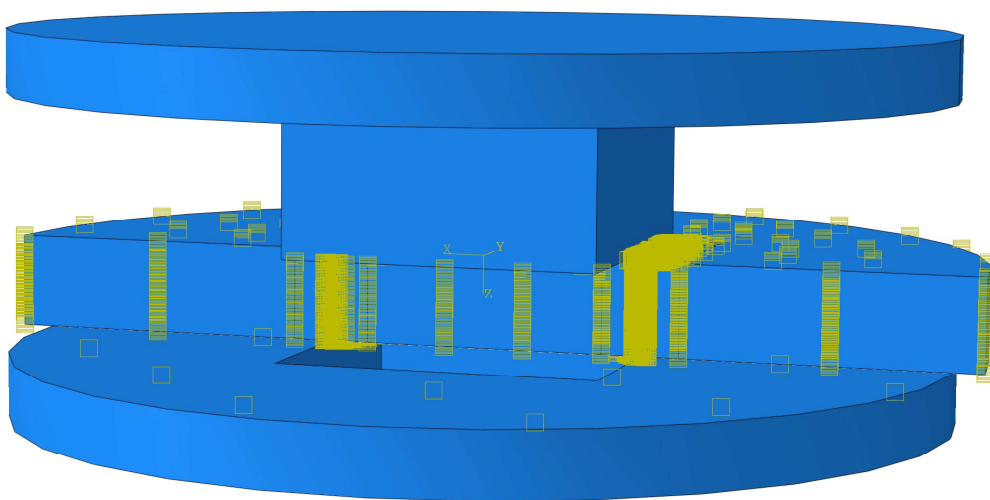


Figura 64 - Interação entre os diferentes elementos da análise do quadrado de 10 mm.

No separador *load* indica-se a velocidade de a que o punção se desloca. Sendo que este dado em específico não é fornecido, foi arbitrado e foi considerado de 100 mm/s. Para se dar esta indicação, são seleccionadas todas as faces do punção (Figura 65).

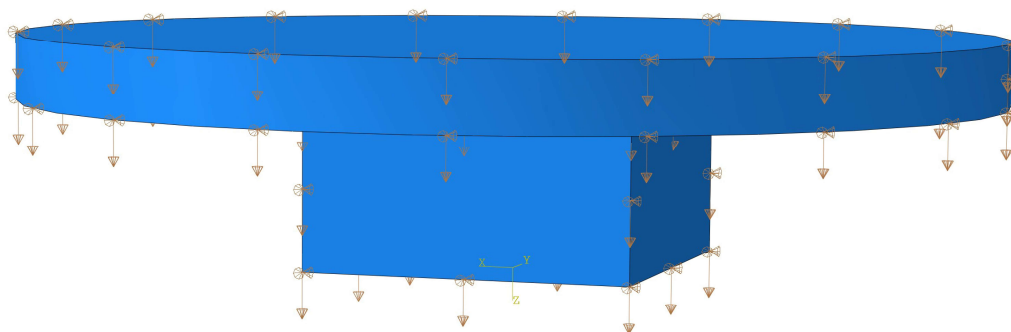


Figura 65 - Indicação da velocidade, do punção quadrado de 10 mm.

É indicado também as condições de fronteira em todos os elementos, ou seja, que a matriz está encastrada, em toda a sua base.

Já o provete de chapa é encastrado na face exterior, de forma a simular o efeito do serra-chapas. No entanto, na face que percorre a metade do corte é de todo indispensável a colocação de forças simétricas, para criar o efeito do corte completo.

Todas estas forças exteriores criadas para a análise de um corte, são visíveis na Figura 66.

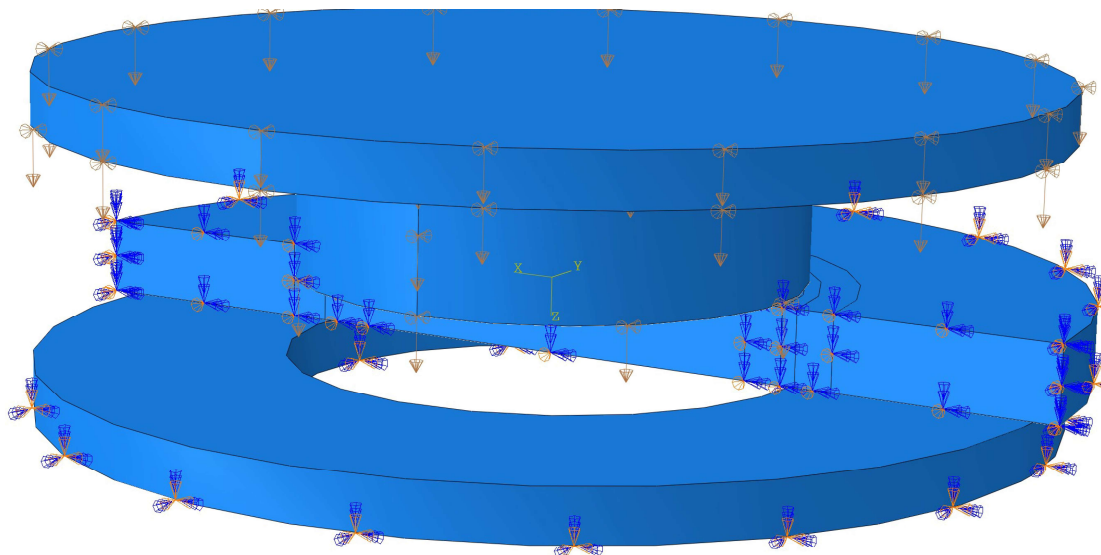


Figura 66 - Forças exteriores aplicadas ao conjunto, no separador *load*, na simulação de corte do redondo de 20 mm e chapa de 3 mm de espessura.

Por fim, a malha é criada no separador *mesh*. Nas ferramentas de corte refinou-se mais os pontos que vão executar de corte, pois estes vão definir a qualidade do corte. E as restantes partes destas não tem grande relevância e por isso são mais grosseiras, já que não interagem com a chapa, assim tornam a simulação menos pesada.

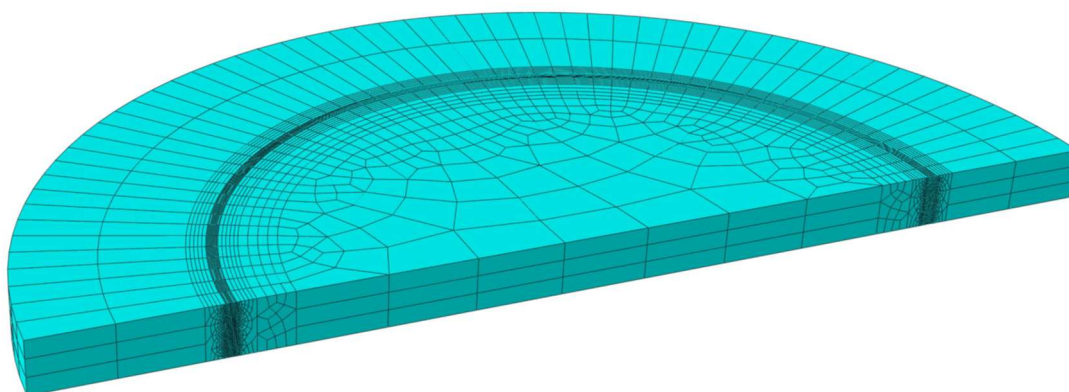


Figura 67 - Malha do provete de chapa com 3 mm de espessura, e punção de 40 mm de diâmetro.

Já no provete de chapa a qualidade da malha toma ainda maior importancia, pois caso este tenha demasiados elementos as simulações tornam se demasiado “pesadas”, e por

razão demoram muito tempo a executar. Para evitar este efeito, apenas se procura refinar a malha, na zona que vai sofrer o cisalhamento, dividindo a espessura de cada um dos provetes em 70 elementos nessa mesma zona, deixando as restantes áreas com muito menos elementos, como se pode comprovar pela Figura 67.

3.5 Simulações realizadas

Para a realização desta dissertação, como já referido, foram realizadas simulações onde apenas existe deformação plástica e outras onde existe corte.

No primeiro caso foram realizadas duas simulações, sendo que a primeira destas trata-se do fabrico de uma nervura, e a segunda cria um degrau que consiste em duas quinagens simultâneas.

Foram realizadas 29 análises onde existe o corte da chapa. E destas pode-se considerar quatro grupos distintos.

O primeiro dos estudos realizados se trata-se de corte puro por punção redondo, tendo sido estes realizados com furos de vários diâmetros, e espessuras de chapa, tendo sido realizadas 20 simulações deste tipo.

O segundo grupo foi realizado com punções quadrados e circulares, e pretende-se analisar alguns possíveis defeitos de fabrico. E a este grupo pertencem 5 simulações.

Com o terceiro grupo pretende-se analisar a influência de diferentes tipos de geometria para a penetração do punção. Neste caso foram utilizados punções retangulares, com três diferentes geometrias.

Por fim o último grupo apenas contém apenas um ensaio. No entanto, neste para além de existir corte, existe em simultâneo execução de deformação da chapa, e trata-se da abertura de um rasgo para a criação de um respiro.

3.5.1 Nervura

Tendo como principal função o aumento da resistência da chapa, evitando a flexão desta, a nervura é também utilizada por opções estéticas, diminuindo a área de chapa plana.

A nervura trata-se de uma operação de deformação, não existindo corte. E como tal, nesta dissertação, é estudada como uma análise estática.



Figura 68 - Matriz e punção para a execução de nervura em chapa de

Para a execução desta operação são utilizadas ferramentas específicas, que têm a forma mostrada na Figura 68.

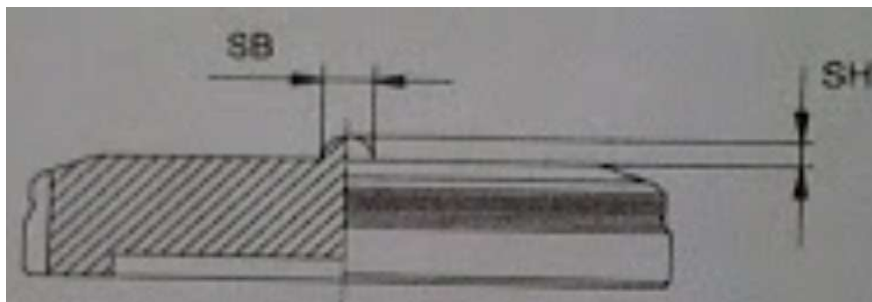


Figura 69 - Dimensões da nervura analisada.

Estas ferramentas têm como função a criação de nervuras com 6 mm de largura e 3 mm de altura, em chapa de 1.5 mm de espessura, (Figura 69) e o comprimento de um só golpe é de 12mm. No entanto estas ferramentas permitem que sejam realizados sucessivos golpes, com um pequeno espaçamento entre eles, de forma a que se realize uma nervura com o comprimento definido no projeto. Como o primeiro golpe é aquele em que as ferramentas terão que exercer maiores forças, e como tal apenas este passo é analisado.

Na Figura 70 é apresentada a disposição das ferramentas para a operação e pode-se também ver a malha para cada um dos corpos.

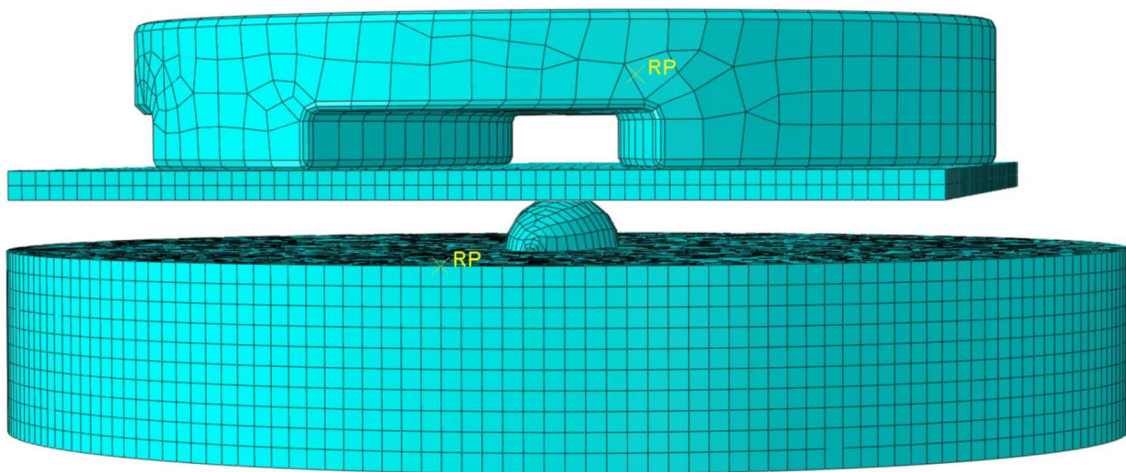


Figura 70 - Malha do conjunto para a análise do processo da nervura.

O processo inicia-se quando o punção toca na chapa e pressiona a chapa contra a matriz, sendo que esta última tem a forma que se pretende passar à chapa. Para tal o punção continua a deslocar-se em direção à matriz, e desde o ponto inicial este desloca-se mais 3 mm.

3.5.2 Degrau

A ferramenta chamada nesta dissertação de degrau (Figura 71) tem como função a criação de um encaixe saliente, que depois de realizado confere à peça o pormenor que se pode visualizar na Figura 72.



Figura 71 - Ferramentas para o fabrico do degrau.

Este destina-se a juntar outras peças à peça que contém este elemento.

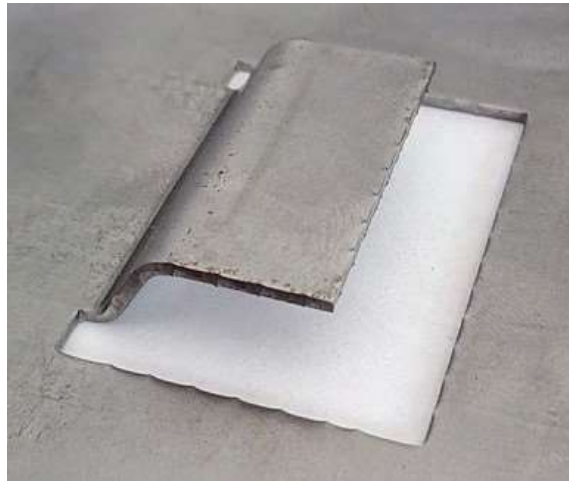


Figura 72 - Forma final do pormenor a analisar, com a ferramenta degrau.

É importante mencionar que para a utilização desta ferramenta é imprescindível a existência de um corte em redor da parte de chapa que se pretende transformar, e este deve ter pelo menos cinco milímetros de largura em três faces específicas, pois as ferramentas utilizadas não conseguem criar o corte, e apenas fazem a transformação plástica.

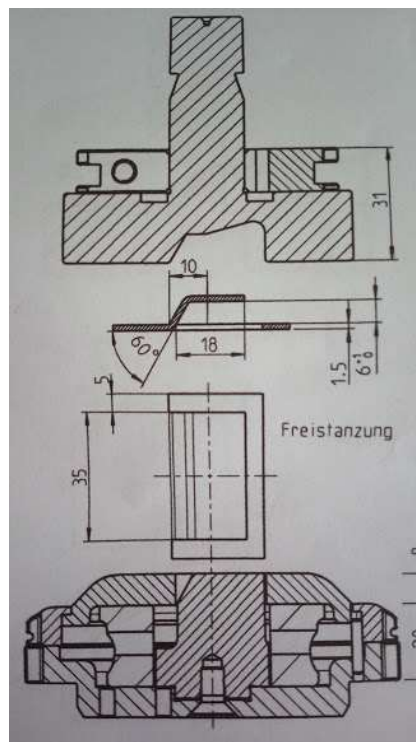


Figura 73 - Ferramentas para o fabrico do "Degrau".

Ou seja, estas ferramentas destinam-se de forma muito simples a criar duas quinagens, de uma forma rápida e evitando que as peças que as contêm tenham que passar por novos postos de trabalho, tornando assim o fabrico das mesmas mais rápido.

As ferramentas para a criação do dito degrau têm a forma apresentada na Figura 73. Na mesma figura podem ver-se as dimensões do degrau, e a indicação do pré corte de cinco milímetros que deve ser previamente cortados.

Como se pode ver, o punção, para além do anel de ajuste que serve de suporte para que a punçoadora consiga segurá-lo, é constituído por uma só peça. Algo que é completamente diferente na matriz, pois esta contém o serra-chapas integrado no conjunto, e este é o elemento 3 apresentado na Figura 74. Por outro lado o elemento 1 é a parte que transmite a forma que é transmitida à peça. Por fim o elemento 2 trata-se do elastómetro que define a pressão que o serra-chapas transmite à chapa.

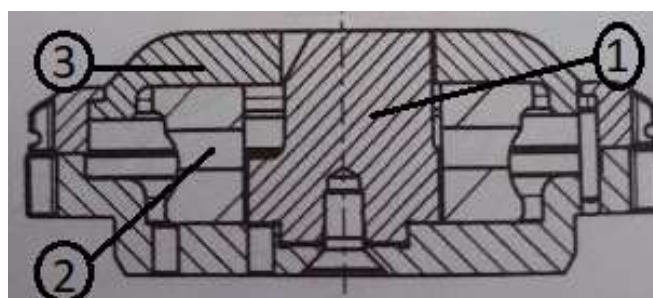


Figura 74 - Matriz para fabrico do degrau.

3.5.3 Furos circulares

Como já referido, este trata-se do grupo com maior número de análises realizadas.

O grande conjunto de análises realizadas com recurso a punções e matrizes de forma circular, tem como objetivo estudar a influência da dimensão do perímetro de corte e da espessura a ser cortadas.

Como tal, foram usados cinco diferentes diâmetros de punção, sendo eles, 6, 10, 20, 40, e 45 mm. Cada um destes diâmetros foi analisado nas espessuras que são cortadas nas instalações da empresa Caradonna nas punçoadoras existentes. Ou seja, em chapa de 1,5, 2, 3 e 4 mm. Na Figura 75, é apresentado como exemplo o punção de 20 mm de diâmetro, com as respetivas quatro matrizes para cada uma das espessuras de chapa estudadas.

Estas combinações perfazem um total de 20 análises distintas. Desta forma é possível analisar os parâmetros anteriormente mencionados.



Figura 75 - Punção de $\varnothing 20$ mm e as respectivas matrizes para as chapas das espessuras em estudo.

Estas análises, tal como as restantes, procuram replicar as condições de corte utilizadas no corte realizado pela empresa. Deste modo, as folgas utilizadas nas simulações são as mesmas, ou seja, 10% do valor da espessura da chapa ser cortada em cada um dos casos. Como tal obtêm-se as folgas apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - tabela do valor das folgas utilizadas, valores em mm.

Espessura da chapa	1,5	2	3	4
Folga	0,15	0,2	0,3	0,4

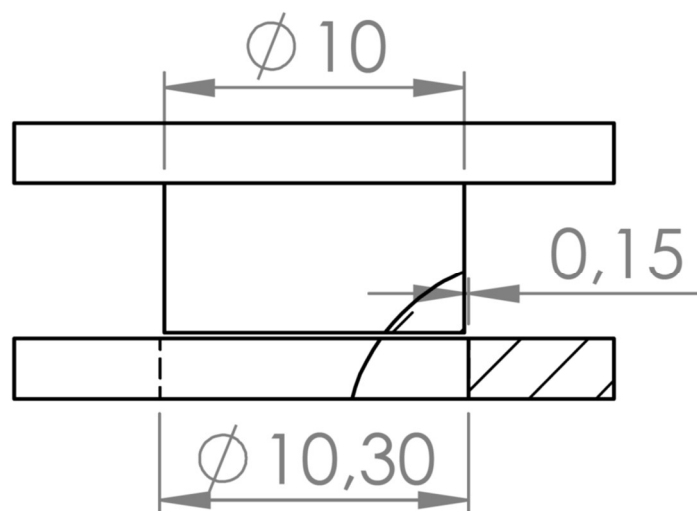


Figura 76 - Modelo das dimensões do punção de $\varnothing 10$ mm e da matriz para o corte de chapa de 3 mm e respetiva folga.

Considerando então as folgas apresentadas, para o corte de um furo redondo de 10 mm de diâmetro numa chapa de 1,5 mm de espessura, deve-se utilizar uma matriz com diâmetro de 10 mm, mais duas vezes o valor da folga. Desta forma o diâmetro da matriz é de 10,3 mm (Figura 76).

3.5.4 Possíveis defeitos de fabrico

Neste grupo de análises pretende-se analisar os efeitos provocados por quatro erros que podem acontecer.

Os dois primeiros podem ocorrer concretamente com um erro do operador. Este pode errar na montagem das ferramentas, ou seja, colocar o par punção-matriz erado ou colocar uma folga maior ou mesmo menor do que a devida.

Para esta análise foi utilizado o punção redondo de 20 mm, a cortar chapa de 3 mm de espessura. Primeiro com uma folga que deveria ser utilizada em chapa de 2 mm e depois com uma folga característica para o corte de chapa de 4 mm. Estas podem ser comparadas com o corte regular da análise previamente realizada com a folga correta para a chapa de 3mm.

Os dois restantes erros podem ocorrer devido a uma problemas existentes na máquina.

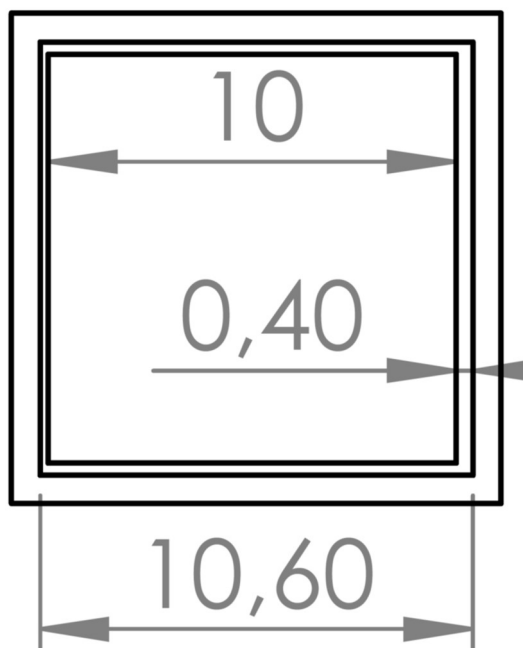


Figura 77 - Relação entre o punção e matriz a quando da perda da concentricidade no caso de estudo realizado.

O primeiro destes é existir um desvio na cabeça de corte e perder-se a concentricidade que tem que existir entre o punção e a matriz. É certo que, se este desvio for significativo pode acontecer que a folga que existe entre as dimensões de ambos não chegar e o

punção acabar por embater na matriz. Mas o que se pretende analisar neste estudo é quando acaba por existir folga suficiente, mas esta acaba por ser maior de um dos lados que do outro.

Este estudo foi realizado com recurso ao punção quadrado de 10 mm de aresta e chapa de 3 mm de espessura. Neste caso, a folga em redor de todo o punção teria que ser de 0,3 mm. No entanto, neste caso numa das faces é 0,4 mm e consequentemente na face oposta é de 0,2 mm, como se pode verificar na Figura 77.

O segundo caso que pode ocorrer devido a problemas na máquina é a perda de paralelismo. Este é um problema que, quando ocorre num puncionamento de um furo redondo, não é detetável. Mas que quando ocorre nas restantes formas geométricas é detetável. Mais uma vez caso o problema seja considerável, podem ocorrer colisões entre o punção e a matriz, o que se pode dar origem a avarias de resolução mais difícil e dispendiosa. Mesmo quando o desvio é suficientemente pequeno para não haver colisões, pode causar problemas, que se pretendem analisar.

Mais uma vez foi utilizado o punção quadrado de 10 mm de aresta, a cortar chapa de 3 mm, para realizar esta análise foi também considerado um desvio de paralelismo de $0,1^\circ$, como se pode ver na Figura 78.

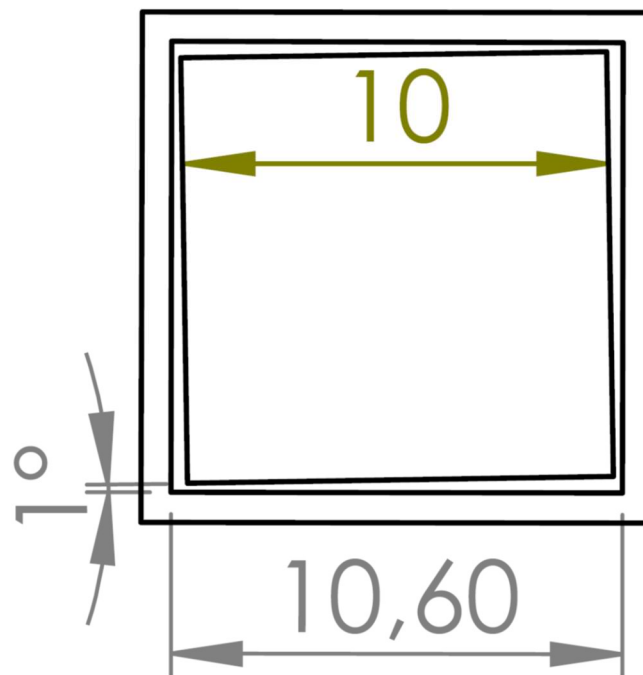


Figura 78 - Relação entre o punção e matriz a quando da perda da paralelismo no caso de estudo realizado.

Para se ter termos de comparação foi também realizada a análise do corte do quadrado de aresta de 10 mm em chapa de 3 mm onde nenhum dos problemas está presente.

3.5.5 Geometrias de penetração

Este conjunto de análises tem como objetivo analisar as alterações criadas ao longo do corte da chapa, quando não são utilizados os punções planos, chamados de *Flat* pelos fabricantes, mas sim punções com formas geométricas distintas que não são paralelos à chapa.

Para realizar esta análise, é simulado o corte de um retângulo de dimensões 15x5 mm² em chapa de 3 mm. Primeiro é considerado um punção de formato *Flat* para servir de base na análise, em dois formatos alternativos.



Figura 79 - Punção com formato *rooftop*, [34].

A primeira é a aquela a que a Trumpf chama de *Rooftop*, ou seja, “topo de telhado”. Esta denominação deve-se ao facto de este tipo de punções terem uma forma de V, fazendo lembrar os tradicionais telhados, como se pode verificar pela Figura 79.



Figura 80 - Verificação do ângulo das ferramentas do tipo *rooftop* da Trumpf.

Na análise realizada, foram utilizados o ângulo de inclinação que os punções deste tipo trazem de fábrica. Como pode ser confirmado na Figura 80, o ângulo do V que vai perfurar a chapa é de 10° .

Tendo em conta o ângulo medido e as dimensões restantes do punção, pode-se concluir que a diferença de altura entre o vértice central e os vértices exteriores é de 0,66 mm, (Figura 81), o que corresponde a aproximadamente 20% da espessura da chapa.

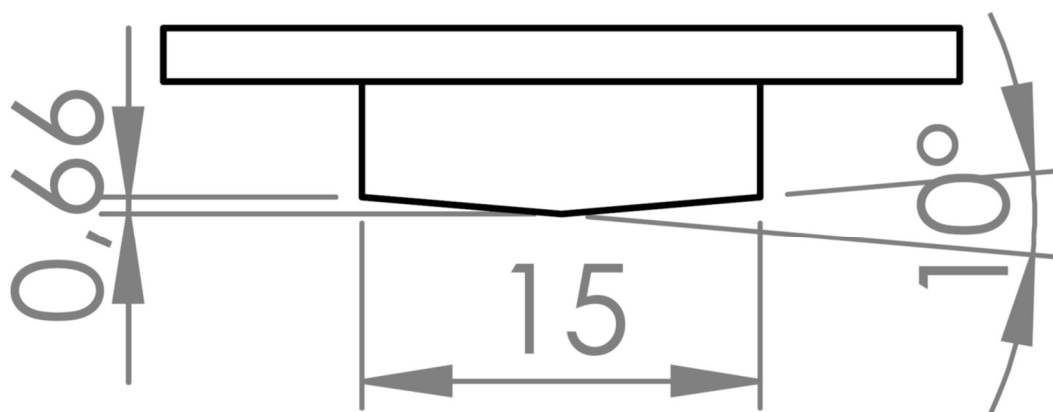


Figura 81 - Dimensões do punção tipo *rooftop* analisado.

O segundo tipo de geometria analisado é aquele a que a Trumpf chama de *Whisper*, ou seja, “sussurro”. Esta designação advém ao facto de a sua geometria levar a que o corte por ela realizado seja gradual e expectavelmente mais suave em relação aos restantes tipos de geometrias de corte. De facto este tipo de geometria inicia o corte num dos extremos da geometria a perfurar e vai cortando até o extremo oposto progressivamente. No entanto esta geometria poderia igualmente ser chamada de cunha. Veja-se na Figura 82 a sua forma.



Figura 82 - Punção com formato *Whisper*, ou cunha [33].

O punção utilizado para esta análise tem as dimensões que são apresentadas na Figura 83, onde se pode verificar que a diferença de altura entre o vértice mais avançado e o mais recuado é de 1,3 mm o que representa aproximadamente 44% da espessura da chapa utilizada nesta análise.

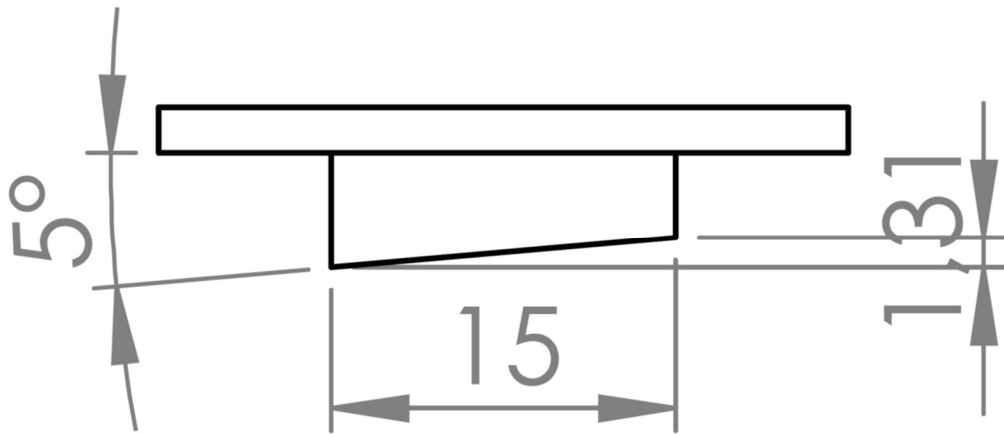


Figura 83 - Dimensões do punção tipo Whisper analisado.

3.5.6 Respiro

Por fim, a última análise realizada, comparativamente com todas as outras análises realizadas, é um processo diferente, pois este trata-se de um processo que conjuga os fenómenos de corte e deformação plástica da chapa em simultâneo.

O objetivo desta operação é a criação de uma abertura, idêntica às aberturas que frequentemente são encontradas nas portas dos cacifos, como as que se podem ver na Figura 84.



Figura 84 – Respiros obtidos a partir da operação a ser analisada [24].

Para tal são utilizadas as ferramentas que são apresentadas na Figura 85. Nestas pode-se verificar que, tal como a ferramenta para a criação da nervura, esta ferramenta vai precisar de vários golpes para o fabrico do respiro. Quanto maior o respiro pretendido, maior o numero de golpes que se terão de ser executados. A qualidade do acabamento da superfície vai depender do avanço entre cada um dos golpes, de tal forma que, quanto menor o avanço entre golpes, melhor se torna a superfície trabalhada do respiro.



Figura 85 - Punção e matriz utilizadas para o fabrico de respiros.

Apesar da necessidade de ser executado mais que um golpe para o fabrico da maioria dos respiros, tal como no caso da nervura, apenas se analisa o primeiro golpe a ser executado pela ferramenta. De facto, este é o golpe que exige maior esforço da parte das ferramentas e mesmo por parte da máquina, já que nos restantes golpes apenas é necessário realizar metade do trabalho. Por essa razão apenas se realiza a análise do primeiro golpe que a ferramenta realiza.

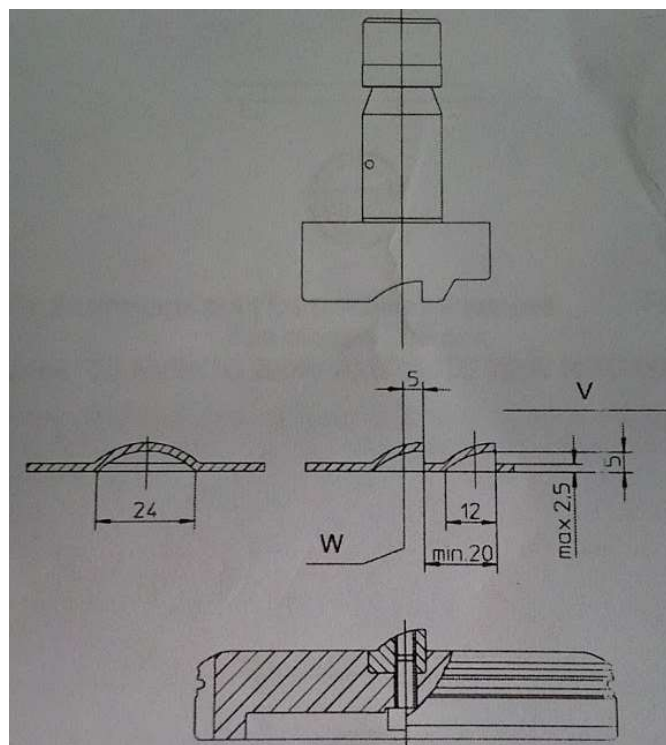


Figura 86 - Desenho técnico das ferramentas para o fabrico de respiros.

Tal como se pode ver na Figura 86, estas ferramentas podem ser utilizadas em várias espessuras de chapa, podendo no máximo ser utilizadas em chapa de 2,5 mm. Na empresa Caradonna, esta é utilizada em chapa de 2 mm de espessura, e por esta razão o ensaio é realizado nessa espessura de chapa.

De igual modo, na Figura 86 podem-se ver as cotas que um só golpe por parte destas ferramentas cria.

3.6 Análise dos resultados obtidos

Após a execução de cada uma das operações anteriormente apresentadas e explicadas, são analisados os valores resultantes de cada análise, e são estudados determinados casos individualmente e outros em grupo, da mesma forma que foram apresentados no capítulo 3.5.

3.6.1 Nervura

Apos a execução da análise, obtém-se a forma pretendida da nervura, como de pode ver pela Figura 87. Pode-se facilmente verificar que as maiores concentrações de tensões ocorrem no centro do local onde existe maior deformação, e nos pontos circundantes destes. Importa também referir que no instante final toda a área do punção pressiona a chapa contra a matriz.

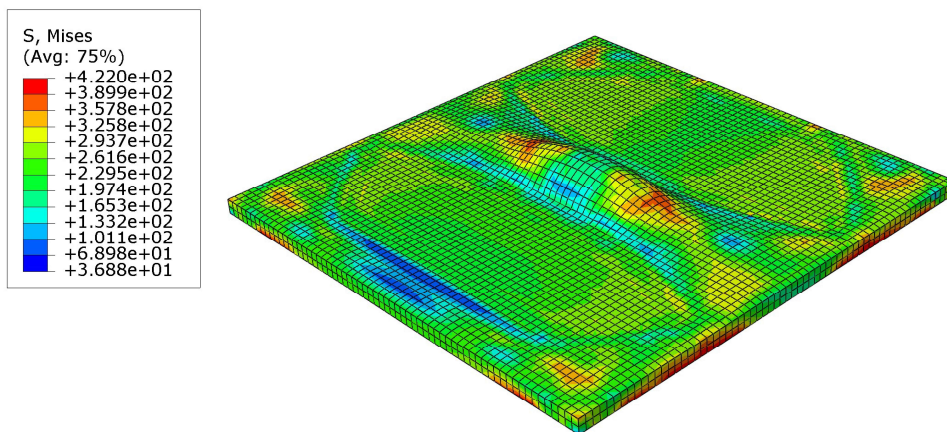


Figura 87 - Chapa após realização da nervura.

Com o decorrer da análise são obtidos os valores das forças necessárias para a realização desta operação, que são apresentados na Figura 88.

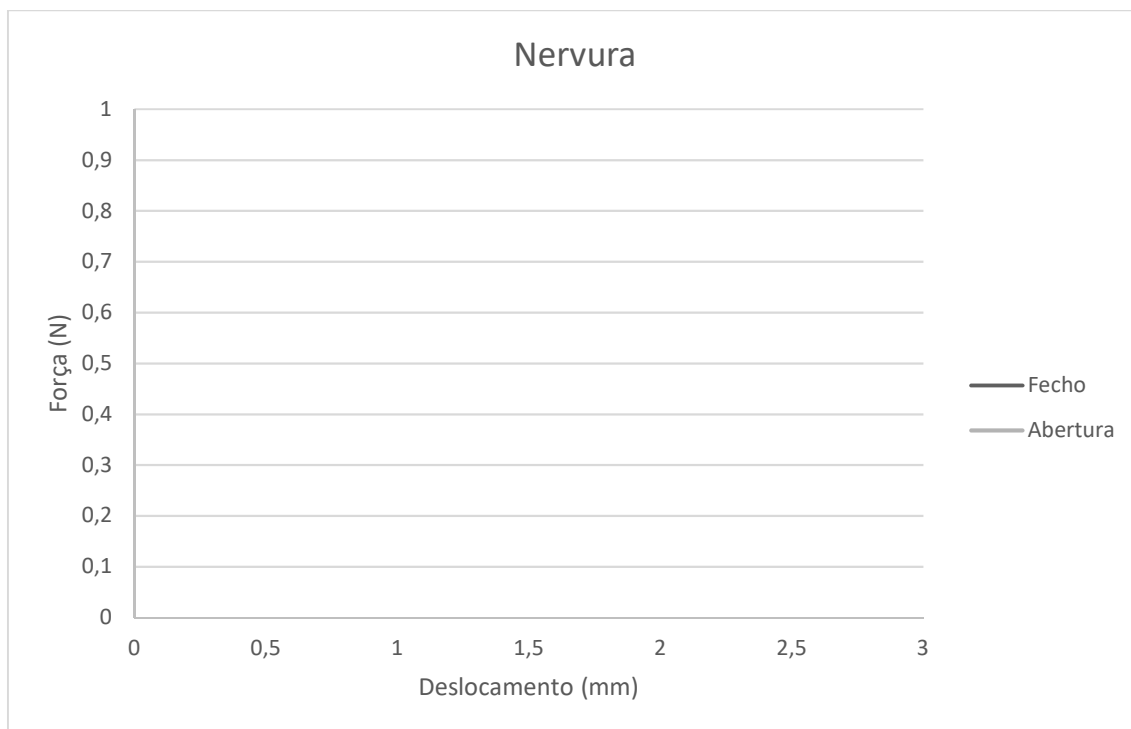


Figura 88 - Valores da força e deslocamento na operação nervura.

Analisando a Figura 88 verifica-se que, logo após o contacto entre o punção e a chapa, ocorre o aparecimento de forças que rapidamente passam de 0 para 2000 N e com um deslocamento de apenas 0,23 mm. Mas a partir deste instante, e até ao deslocamento 2,97 mm, as forças vão aumentando de forma linear, atingindo o valor de 12300 N, sendo que neste instante o punção pressiona, com toda a sua área, a chapa contra a matriz (Figura 89), levando assim ao aumento bastante acentuado da força que se verifica no final do fecho da análise.

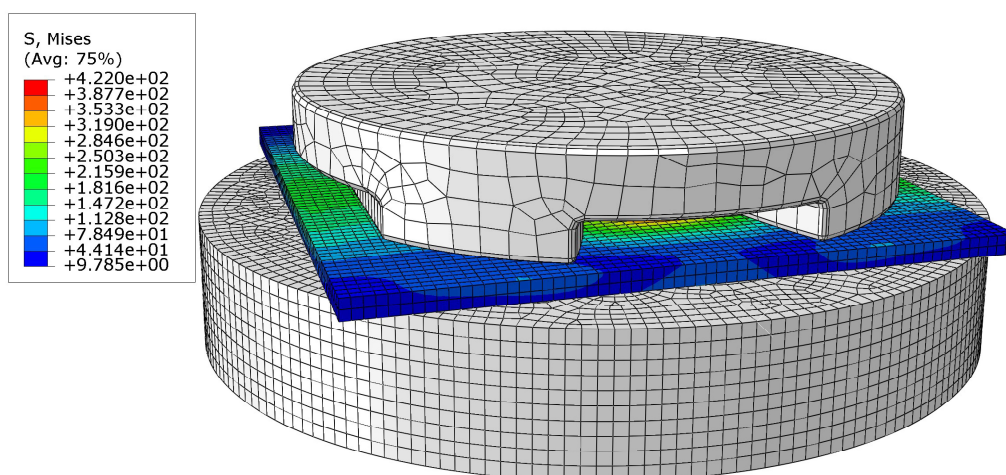


Figura 89 - Instante em que o punção pressiona toda a chapa contra a matriz.

Completando-se o ciclo de compressão da análise, inicia-se a abertura das ferramentas. Aqui verifica-se uma queda abrupta da força, uma vez que da força máxima registada passa para uma força de apenas 407 N, sendo que esta é depois constante, e trata-se de uma força residual que se mantém devido ao contacto da chapa com a matriz.

Realizando um corte na chapa, após o final da simulação, pelo centro da nervura, é também possível verificar uma diminuição da espessura da chapa, que ocorre com o fabrico da mesma, tal como se pode verificar na Figura 90.

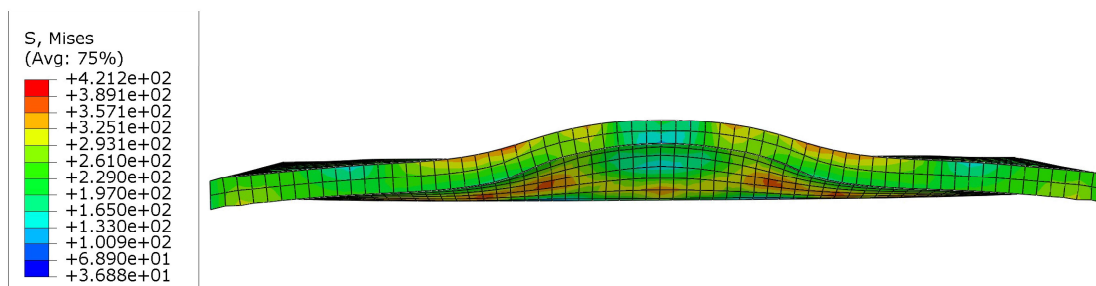


Figura 90 - Corte pelo centro da nervura apos o final da simulação.

3.6.2 Degrau

Na Figura 91 pode-se ver o resultado final da análise ao processo do degrau. Facilmente se verifica que este processo consiste na execução de duas quinagens em simultâneo.

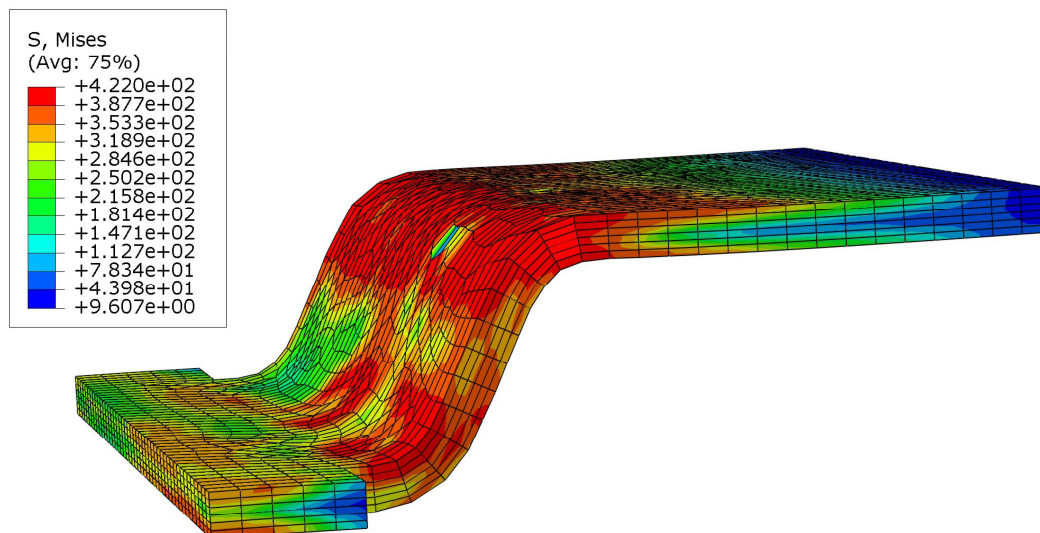


Figura 91 - Resultado final do provete de chapa na análise do degrau.

Observando o gráfico obtido no decorrer da análise (Figura 92), conclui-se que o processo pode ser dividido em várias etapas. Como tal, é importante perceber o que acontece em cada uma delas.

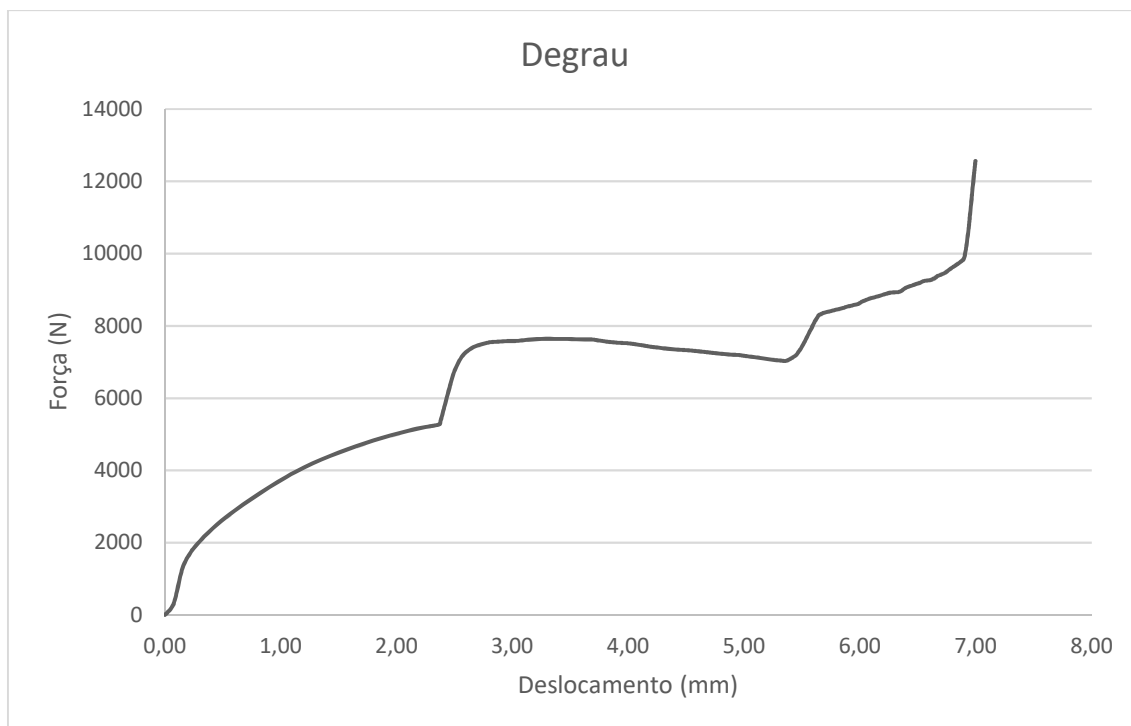


Figura 92 - Valores da força e deslocamento obtidos na análise do degrau.

A primeira etapa inicia-se aquando do contacto do punção com a chapa, e vai até ao momento em que o punção se deslocou 2,37 mm. Neste intervalo de tempo a força vai aumentando, mas não de forma constante, pois inicialmente vai aumentando mais rapidamente, e vai gradualmente diminuindo o declive da curva, atingindo uma força máxima de 5355 N. Analisando graficamente este intervalo, verifica-se que apenas uma das quinagens é realizada.

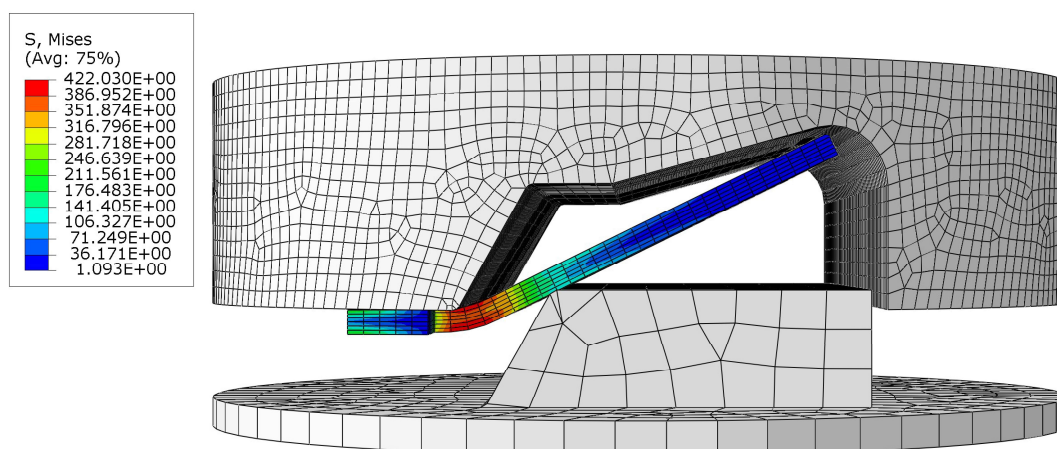


Figura 93 - Instante da análise do degrau em que termina a primeira fase.

Observando a Figura 93, que se trata do momento final da primeira fase, verifica-se que até este instante a chapa apenas se encontra em contacto com o punção numa aresta. No entanto, a chapa está na iminência de iniciar um novo contacto. Este novo contacto ocorre entre a extremidade do provete de chapa e a zona circular do interior da matriz.

A partir do momento em que se inicia o novo contacto, inicia-se a segunda fase da operação, e com ela também o início da criação da segunda quinagem. Nesta segunda fase verifica-se novamente um grande aumento das forças, na fase inicial, atingindo rapidamente os 7644 N. Mais uma vez, mas a força vai diminuindo conforme o provete de chapa vai ficando paralelo com a face inclinada do punção, acabando por diminuir até aos 7032 N. O instante final desta fase é visível na Figura 94, onde se vê que, a partir deste instante, a chapa será forçada por um novo apoio, o vértice que une a face inclinada com a face horizontal do punção.

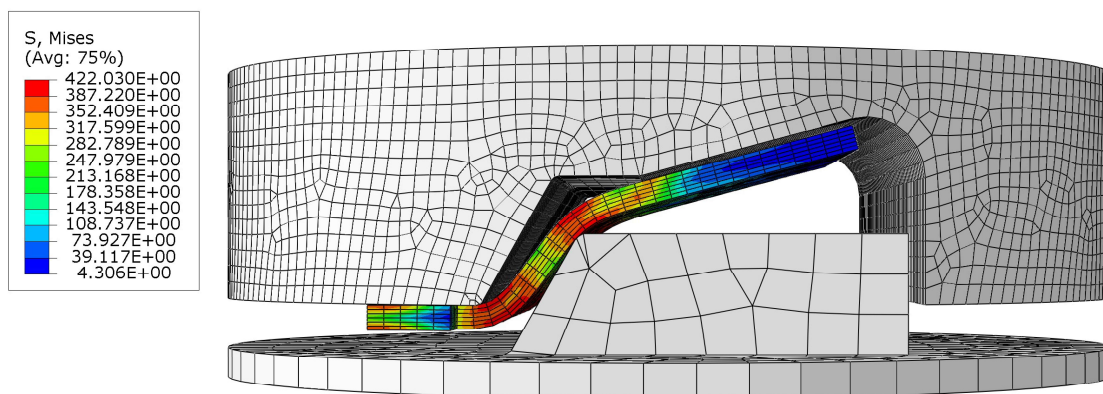


Figura 94 - Instante da análise do degrau em que termina a segunda fase.

No instante em que a segunda quinagem passa a ser realizada pelo novo apoio (Figura 95), inicia-se a terceira fase e verifica-se um novo aumento da força, e novamente de uma forma mais rápida no início, atingindo os 8295 N. A força continua a aumentar de forma linear, mas com menos rigidez, até atingir os 9842 N.

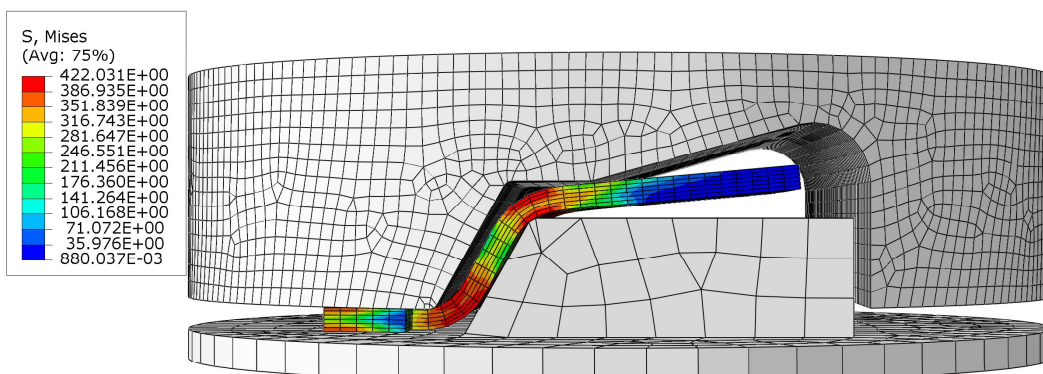


Figura 95 - Terceira fase do fabrico do degrau.

Por fim, tal como acontece no fabrico da nervura, todo o punção vai pressionar a chapa contra a matriz, fazendo assim que o valor da força aumente de forma muito rápida, até atingir os 12567 N (Figura 96).

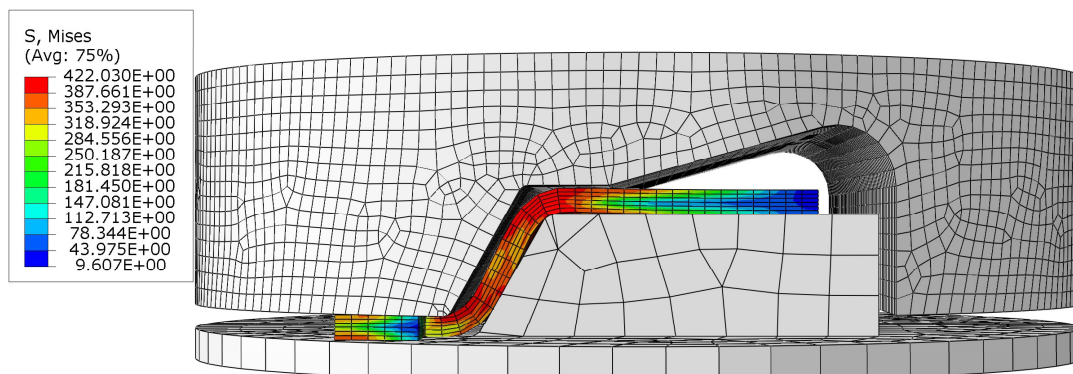


Figura 96 - Momento final da análise do degrau.

Nesta análise não foi realizada a abertura das ferramentas, pois este processo é em todo idêntico ao da nervura.

3.6.3 Furos circulares

Aqui pretende-se verificar a influência da variação do perímetro de corte e da espessura da chapa na força resultante para executar o corte. Como já referido na apresentação das análises, foram realizadas diversas análises para tal.

No entanto, primeiro são apresentados os fenómenos que ocorrem quando se realiza um corte com um punção.

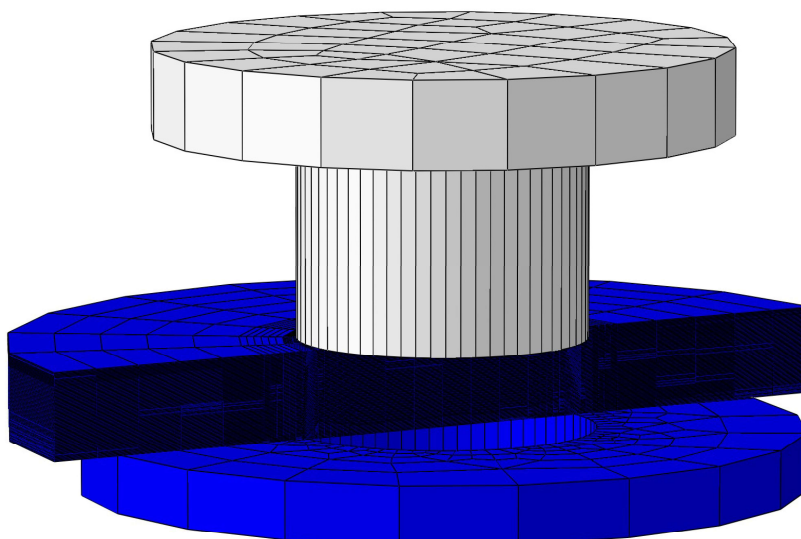


Figura 97 - Elementos utilizados para a realização da análise do furo redondo de diâmetro de 10 mm e chapa de 3 mm de espessura.

Para tal utiliza-se como exemplo o punção circular de 10 mm de diâmetro e a chapa de 3 mm de espessura. A Figura 97 mostra os vários elementos utilizados nesta análise, punção, chapa e matriz, tal como a sua disposição, no início da análise.

Os valores para a força e deslocamento obtidos no decorrer da referida análise são apresentados na Figura 98.

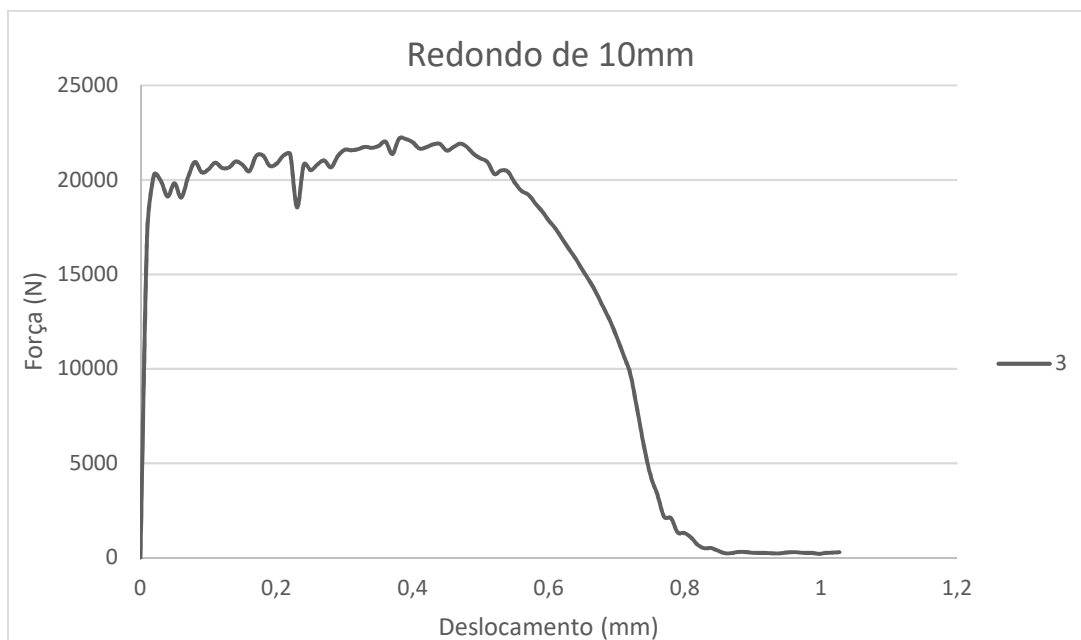


Figura 98 - Valores da análise ao punção de 10 mm de diâmetro.

De aludir que, mal o punção entra em contacto com a chapa, a força aplicada vai para valores próximos do máximo. Nesta fase a chapa está apenas em tensão e, devido à compressão que sofre, pelo facto de ser comprimida pelo punção contra a matriz, gera uma força de 17194 N. É possível comprovar este fenómeno na Figura 99.

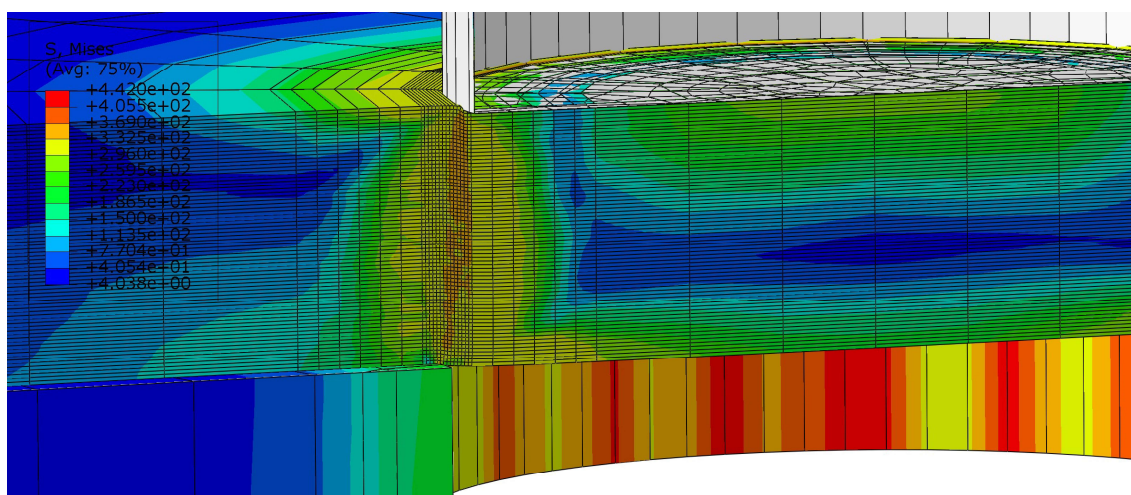


Figura 99 - Fase onde o punção pressiona a chapa contra a matriz provocando compressão.

Com o continuar do deslocamento do punção, e quando este atinge os 0,22 mm após ter entrado em contacto com a chapa, inicia-se o corte por cisalhamento, como se pode ver na Figura 100.

Neste instante é exercida uma força de 21357 N sobre a chapa, que teve um ligeiro aumento desde o instante em que a chapa apenas era comprimida até ao momento em que se inicia o corte.

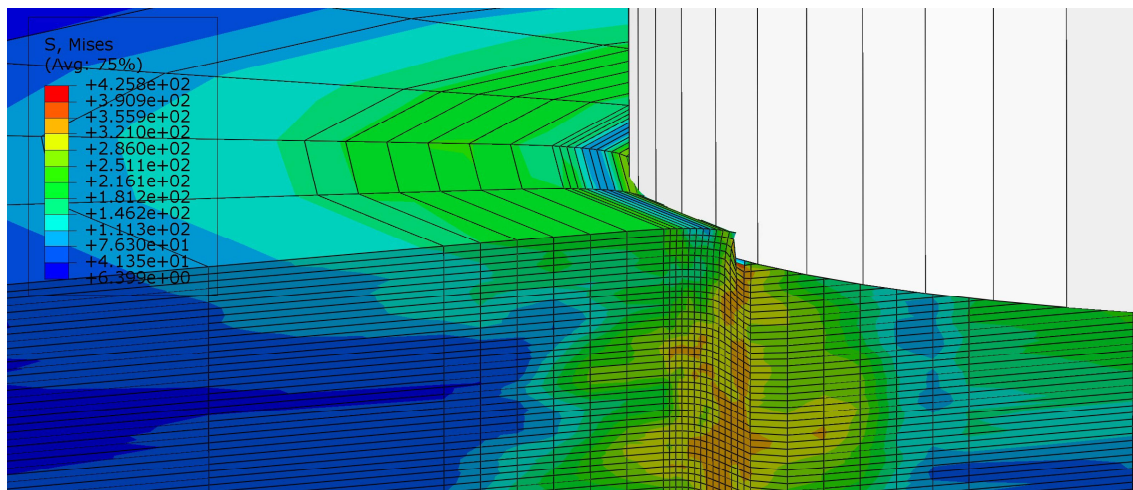


Figura 100 - Início do corte por cisalhamento.

O corte por cisalhamento vai progredir até ao momento em que a chapa vai terminar por ceder e terminar o corte por arrancamento. Este novo fenómeno ocorre no momento em que o punção tem um deslocamento de 0,57 mm. Neste momento, a força de corte já sofreu uma diminuição de intensidade, tendo neste instante um valor de 19212 N. No entanto, anteriormente tinha tido um acréscimo onde atingiu o valor máximo de 22187 N, valor este que se trata do valor máximo de força atingido em toda a análise.

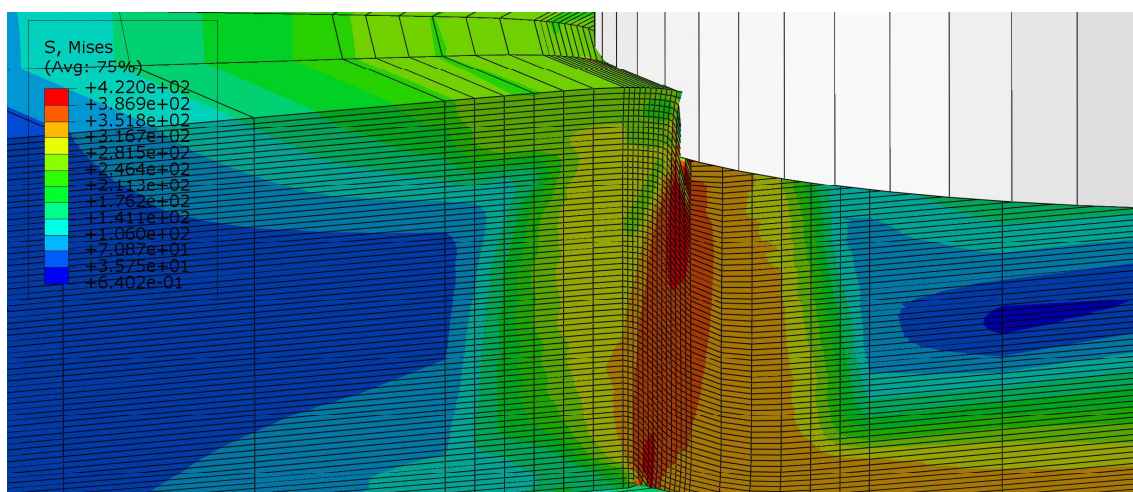


Figura 101 - Instante em que se inicia o corte por arrancamento.

Na Figura 101 é possível ver-se o início do corte por arrancamento, tanto na face em que a chapa está em contacto com o punção, como na face onde está em contacto com a matriz.

A partir deste instante, a força de corte vai iniciar uma grande diminuição da sua intensidade, assim como a chapa passa rapidamente a estar completamente cortada. Veja-se que, no instante em que o punção se deslocou 0,85 mm desde do início de todo o processo, e apenas 0,28 mm desde o início do corte por arrancamento, a força diminui para residuais 234 N, e a chapa passa a estar completamente cortada, tal como se pode comprovar pela Figura 102.

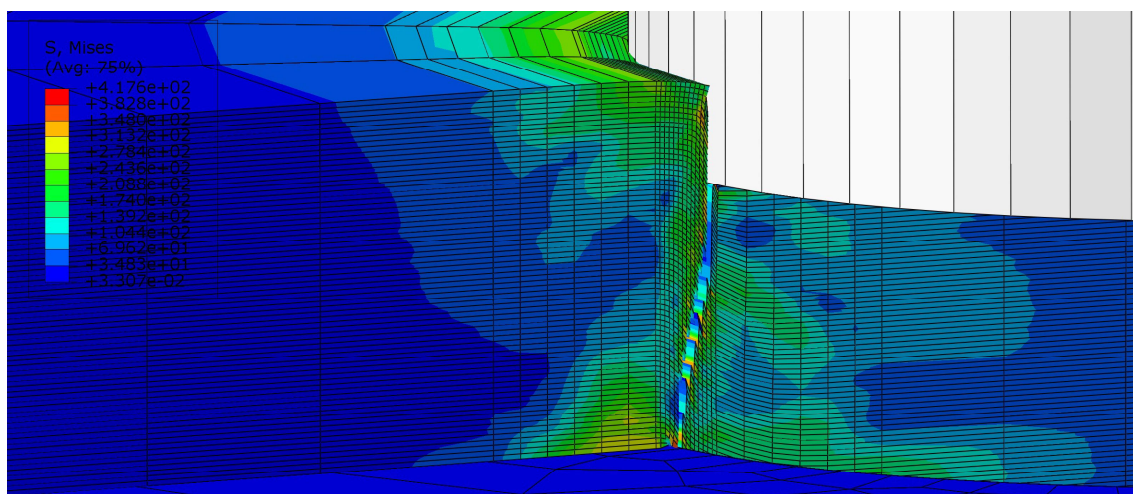


Figura 102 - Instante em que a chapa fica completamente cortada.

O comportamento observado neste exemplo de corte é idêntico ao comportamento observado nas restantes análises dos cortes de furos circulares, tendo em conta que os valores das forças e os instantes em que cada um destes fenómenos ocorre variam com o diâmetro e espessura da chapa que se analisar em cada caso. Como tal as restantes análises, estes instantes serão apresentados de forma mais breve com o foco nos valores obtidos.

Serão assim apresentadas as análises realizadas para os furos de 6, 10, 20, 40 e 45 mm de diâmetro, e cada uma delas para as espessuras de 1,5, 2, 3 e 4 mm de espessura de chapa.

Para as análises dos furos de 6 mm de diâmetro, são obtidos os valores de força e deslocamento apresentados na Figura 103.

Analisando a figura, é possível verificar que, quanto mais espessa a chapa, maior é o valor da força necessária para o seu corte. Da mesma forma, mais o punção necessita de se deslocar para que cada uma das fases do corte ocorram.

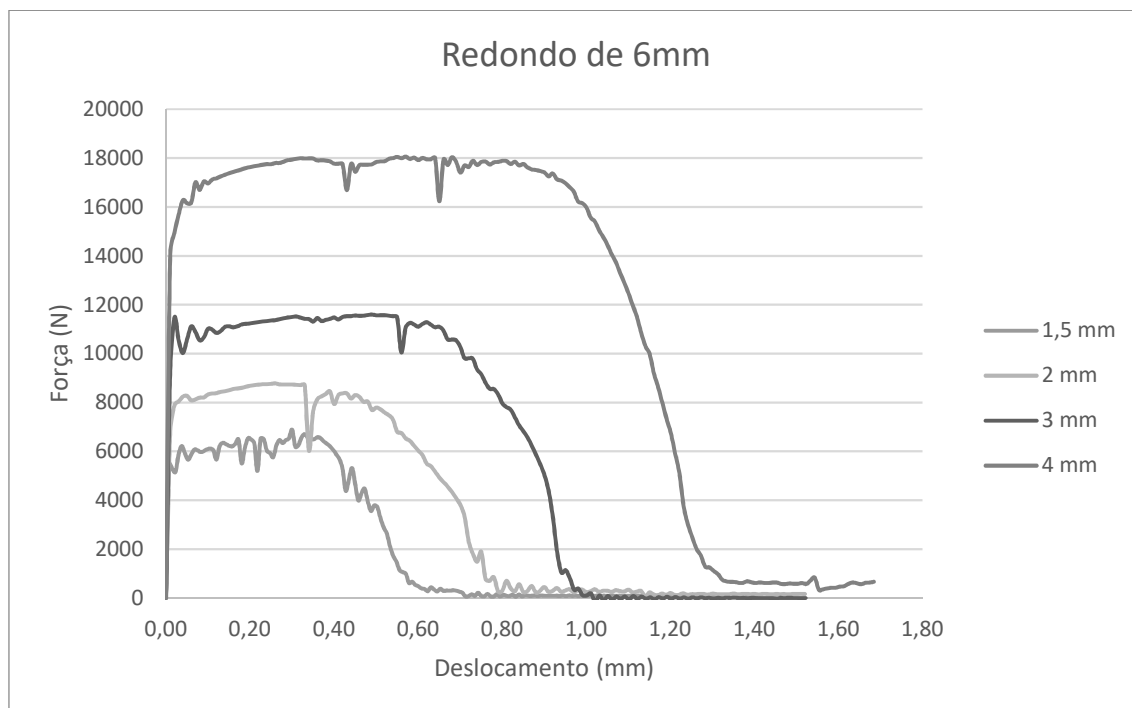


Figura 103 - Valores de força e deslocamento obtidos na análise dos furos de 6 mm de diâmetro.

Tabela 8 - Valores de início das fases de corte para o punção de 6 mm de espessura.

Ø 6 mm	Compressão		Corte cisalhamento		Corte arrancamento	
Espessura de chapa (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1,5	5484	0,008	6205	0,157	6563	0,34
2	6811	0,010	8503	0,149	8457	0,39
3	9313	0,010	11295	0,220	11552	0,47
4	14076	0,010	17637	0,200	18037	0,68

Na Tabela 8 são apresentados os valores das forças e respetivos deslocamentos para o início da cada uma das fases referidas anteriormente na análise do corte de diâmetro de 10 mm e chapa de 3mm, mas neste caso para o punção de 6 mm diâmetro e para cada uma das espessuras analisada. Nesta tabela é possível confirmar, tal como se previa na análise da Figura 103, que quanto maior a espessura da chapa maior é o deslocamento e a força necessária para que ocorra cada uma das fases do corte.

Para comprovar estes factos, são apresentados as forças e deslocamentos para os restantes furos de diferentes diâmetros.

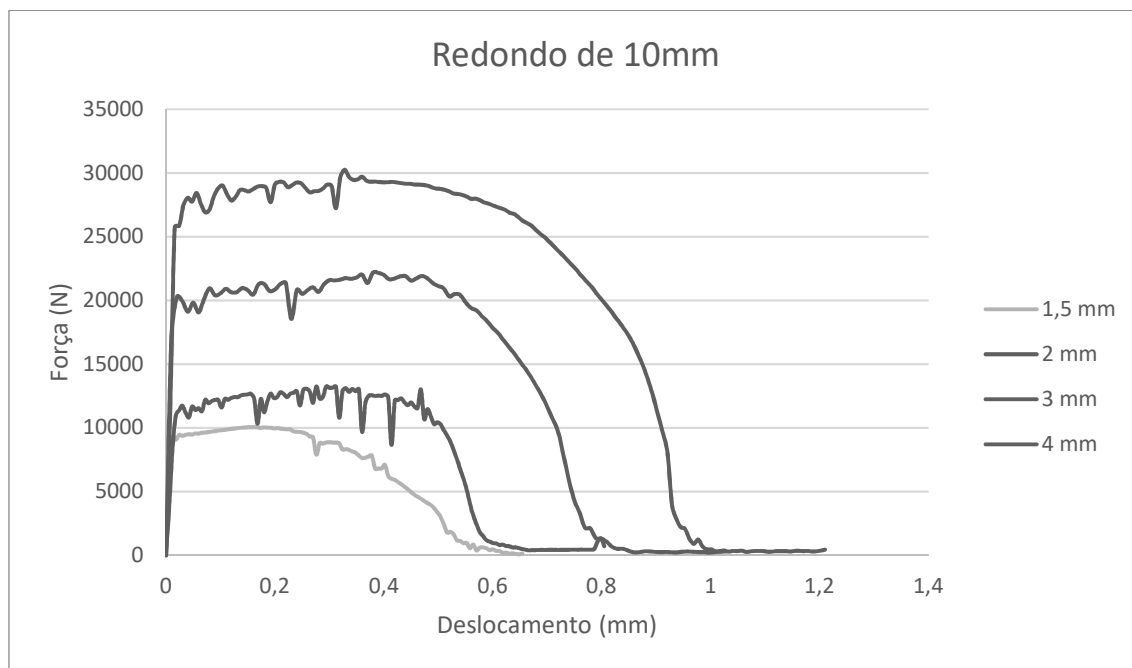


Figura 104 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 10 mm.

A Figura 104 apresenta os valores da força e deslocamento para os cortes de diâmetro de 10 mm. A partir desta é possível obter os valores de início de cada uma das fases apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de início das fases de corte para o punção de 10 mm de espessura.

\varnothing 10 mm	Compressão		Corte cisalhamento		Corte arrancamento	
Espessura de chapa (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1,5	4452	0,006	10040	0,161	9617	0,251
2	8404	0,012	11222	0,179	11979	0,437
3	17194	0,010	20856	0,2	19843	0,549
4	25751	0,016	29086	0,295	28279	0,544

Como esperado, verifica-se que, quanto mais espessa a chapa, maior é a força e deslocamento para o surgimento de cada uma das fases e para que se consiga realizar o punçonnemento.

Na Figura 105 são apresentados os valores obtidos nas diversas análises para os furos de 20 mm de diâmetro, e na Tabela 10 são apresentados os valores da força e dos deslocamentos para o início de cada uma das fases, para cada uma das espessuras de chapa analisadas.



Figura 105 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de Ø 20 mm.

Tabela 10 - Valores de início das fases de corte para o punção de 20 mm de espessura.

Ø 20 mm	Compressão		Corte cisalhamento		Corte arrancamento	
Espessura de chapa (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1,5	11503	0,008	12253	0,165	18152	0,323
2	17502	0,010	23593	0,110	20544	0,310
3	25354	0,010	39493	0,160	34691	0,820
4	34987	0,010	58510	0,310	57352	0,440

Analisando os valores obtidos para a análise do furo de 20 mm para a chapa de espessura de 4 mm, observa-se que esta não respeita o padrão, e que para o início do corte por arrancamento ocorre com um deslocamento menor do que o esperado. Tal deve-se ao facto de o corte não ter ocorrido pelo local esperado, o que pode acontecer devido a uma definição errada da malha que, devido a uma maior força do que nas restantes espessuras de chapa, deveria ser diferente.

Para as análises aos furos de 40 mm de diâmetro foram obtidos os valores de força e deslocamento apresentados na Figura 106.

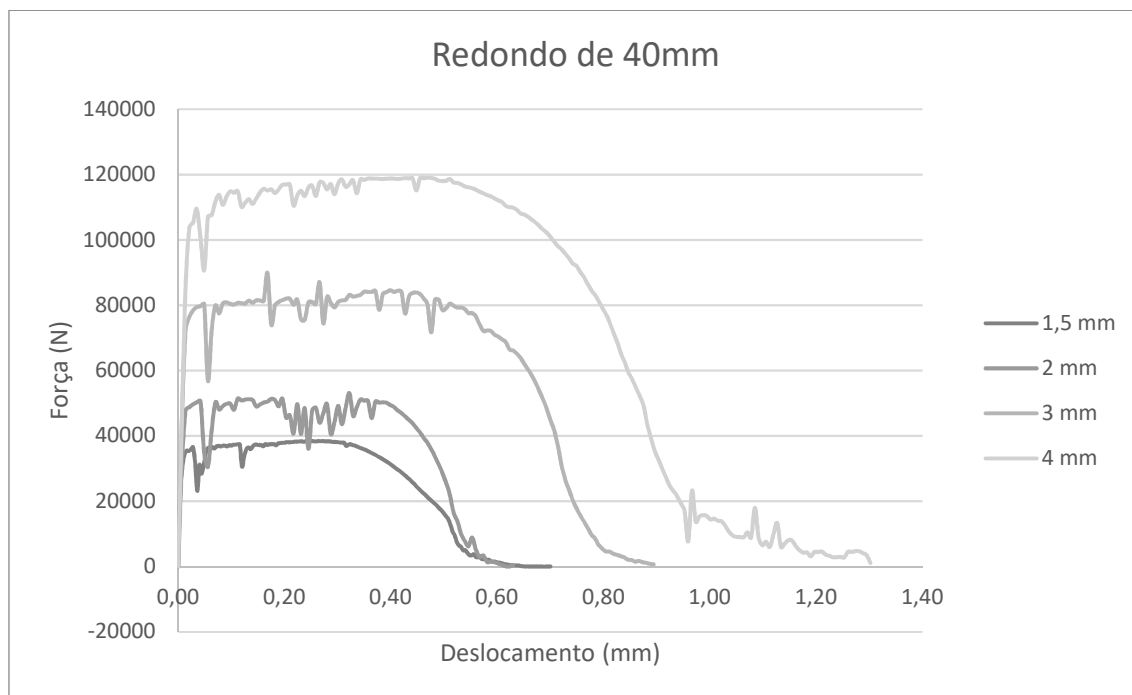


Figura 106 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 40 mm.

Na Tabela 11 são apresentados os valores das forças e respectivos deslocamentos para o início de cada uma das fases do corte.

Tabela 11 - Valores de início das fases de corte para o punção de 40 mm de espessura.

\varnothing 40 mm	Compressão		Corte cisalhamento		Corte arrancamento	
Espessura de chapa (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1,5	30684	0,008	36486	0,028	37266	0,320
2	31033	0,007	30539	0,056	50149	0,392
3	44512	0,007	72433	0,063	83425	0,455
4	45575	0,007	100599	0,042	117611	0,518

Na análise do redondo de 40 mm volta-se a verificar o padrão, em que, para que cada uma das fases surja, quanto maior a espessura da chapa, maior é a força necessária a aplicar, tendo também tendência a que estas forças se verifiquem com maiores deslocamentos.

Por fim, serão apresentados os valores para as últimas análises deste grupo, os furos circulares de 45 mm de diâmetro.

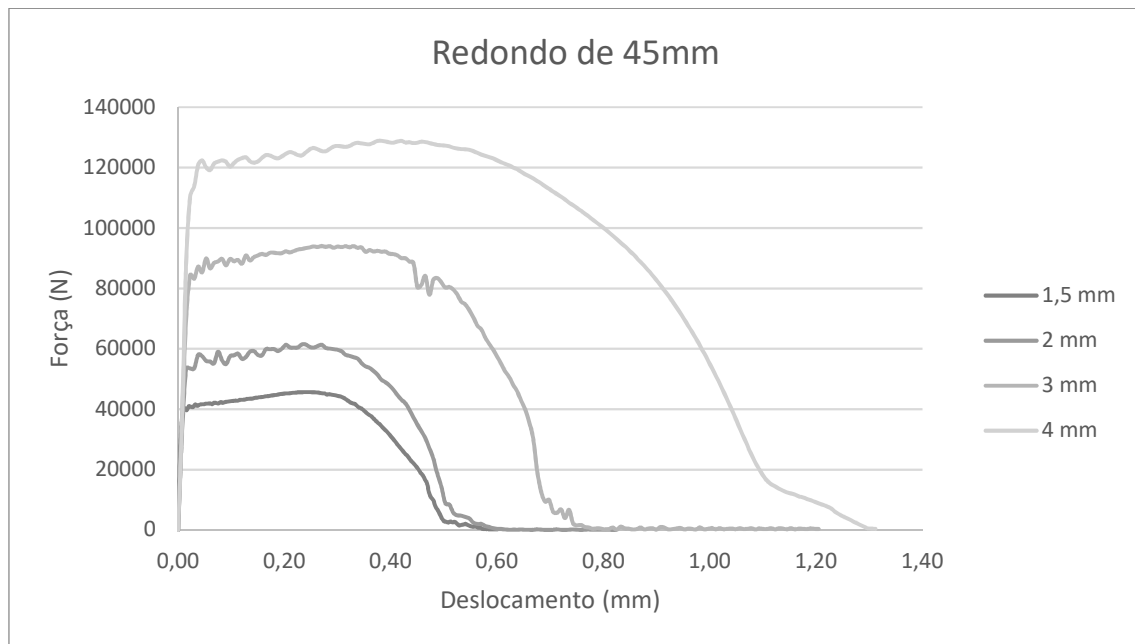


Figura 107 - Valores das forças e deslocamentos da análise do furo de \varnothing 45 mm.

Os valores obtidos para a força e deslocamento ao longo das análises são apresentados na Figura 107, e na Tabela 12 são apresentados os valores para as forças e respectivos deslocamentos para o início de cada uma das fases do corte.

Tabela 12 - Valores de início das fases de corte para o punção de 45 mm de espessura.

\varnothing 45 mm	Compressão		Corte cisalhamento		Corte arrancamento	
Espessura de chapa (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1,5	38681	0,008	42129	0,084	45645	0,248
2	47821	0,014	57534	0,098	50299	0,385
3	70119	0,015	89243	0,135	80495	0,510
4	88560	0,015	121618	0,143	128444	0,435

Tal como na análise dos furos redondos de 40 mm, os furos de 45 mm mostram-se coerentes, com o espectável.

Tendo agora todos os valores disponíveis, passa a ser então possível realizar a análise da influência do perímetro de corte e da espessura da chapa nos valores das forças que têm de ser aplicadas para a realização do corte recorrendo ao punçonnemento.

A Tabela 13 apresenta os valores das forças máximas necessárias para a realização de cada um dos furos em cada uma das espessuras de chapa analisadas.

Tabela 13 - Valores das forças máximas para o corte de cada uma das 20 análises.

espessura da chapa	Diâmetro do furo (mm)				
	6	10	20	40	45
1,5	6889	10047	20574	38448	45671
2	8787	13244	25853	53126	61452
3	11601	22187	43862	89905	94082
4	18065	30258	58741	119075	128899

Com os valores obtidos é possível criar linhas de tendência para cada uma das espessuras, que são apresentadas na Figura 108.

Analisando a figura é possível verificar que, para cada um dos diâmetros, é obtida uma linha de tendência praticamente reta.

Quanto maior o valor do diâmetro, mais inclinada é essa linha, o que significa que, quanto maior o diâmetro do furo a realizar, mais o valor da força vai crescer para o corte de chapa de maior espessura.

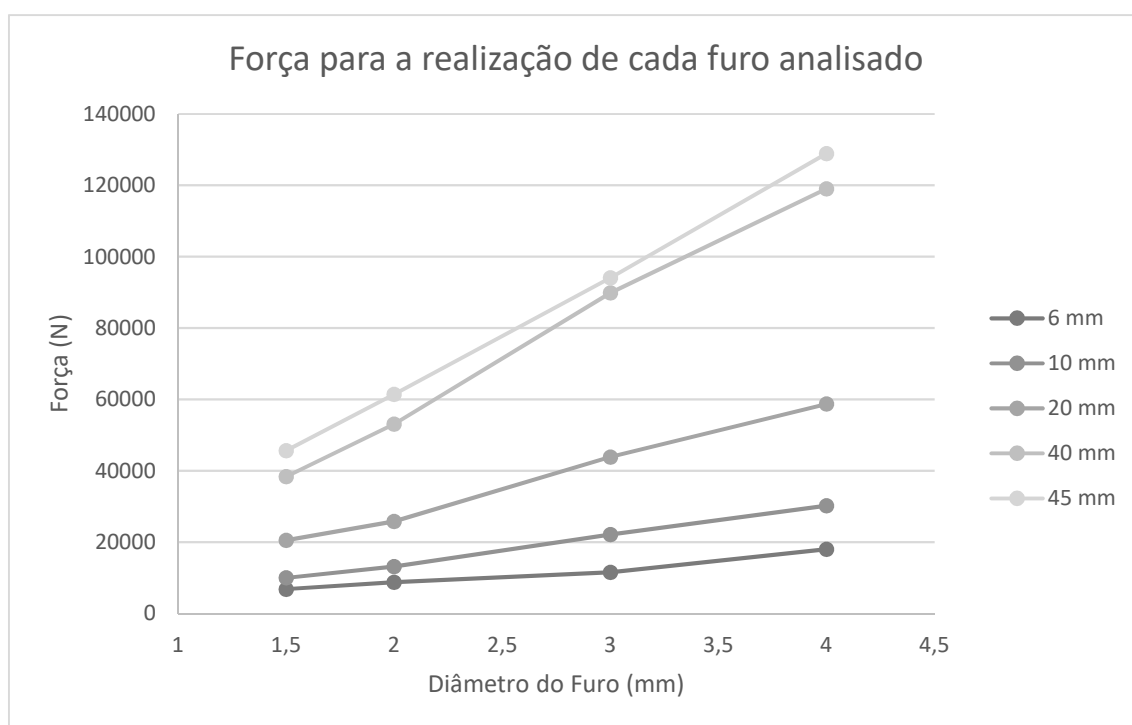


Figura 108 - Linhas de tendência da força para cada um dos diâmetros analisados.

Comparando os valores obtidos com os valores esperados, através o cálculo teórico, verifica-se que os valores obtidos são em média 30% inferiores. Isto é justificável tendo em conta o facto de os valores obtidos terem em conta o fator dinâmico das análises e o cálculo teórico não ter este fator em conta.

3.6.4 Possíveis defeitos de fabrico

Neste subcapítulo, como já referido, são apresentados dois tipos diferentes de possíveis defeitos de fabrico, sendo estes apresentados neste subcapítulo pela mesma ordem em que foram apresentados anteriormente.

Como tal, primeiro é apresentado o caso em que as folgas estão alteradas para a chapa que se está a cortar.

Estes ensaios são realizados com o furo circular de 20 mm de diâmetro e chapa de 3 mm de espessura, para o qual já se obteve o valor da força e do deslocamento para a folga de 10% da espessura, ou seja, 0,3 mm.

Estes valores serão comparados com aqueles obtidos nas análises a ser realizadas neste subcapítulo. Na primeira delas, a folga será de apenas de 0,2 mm, que deveria ser utilizada em chapa de 2 mm de espessura. Na segunda, considera-se uma folga de 0,4 mm, que é tipicamente utilizada para chapa de 4 mm de espessura.

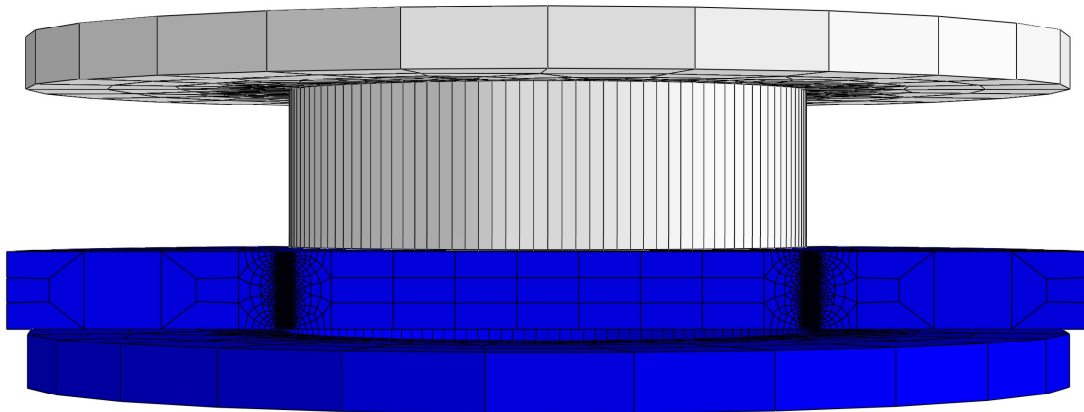


Figura 109 - Elementos utilizados na análise do furo de $\varnothing 20$ mm e chapa de 3 mm mas com folga de apenas 0,2 mm.

Na Figura 109 pode-se ver a malha, ferramentas e chapa, utilizados na análise da folga de apenas 0,2 mm.

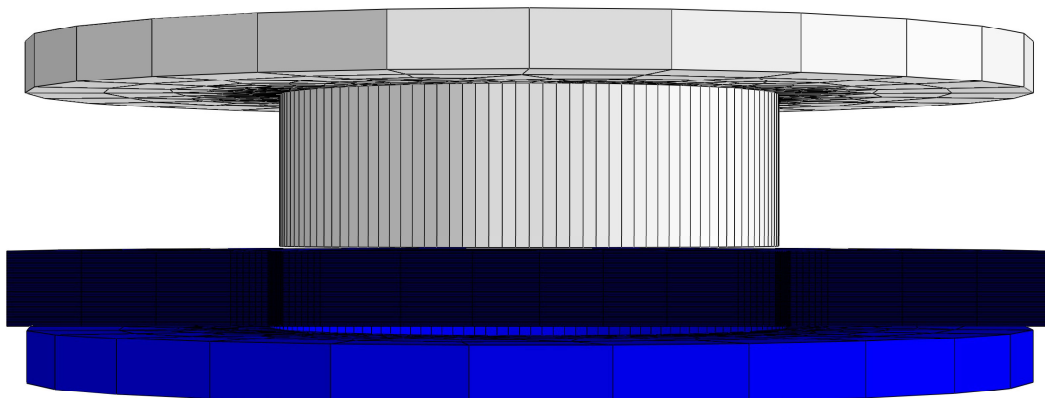


Figura 110 - Ferramentas e chapa para a realização da análise do corte uma folga de 0,4mm.

As ferramentas e chapa utilizadas na análise da folga com 0,4 mm são visíveis na Figura 110.

Com o decorrer desta análise, é obtido o valor da força que atua ao longo da análise e o respectivo deslocamento, que são apresentados na Figura 111. São também visíveis as forças e deslocamentos da análise já apresentada do corte com a folga de 0,3 mm, regularmente utilizada, assim como com a folga de 0,4 mm.

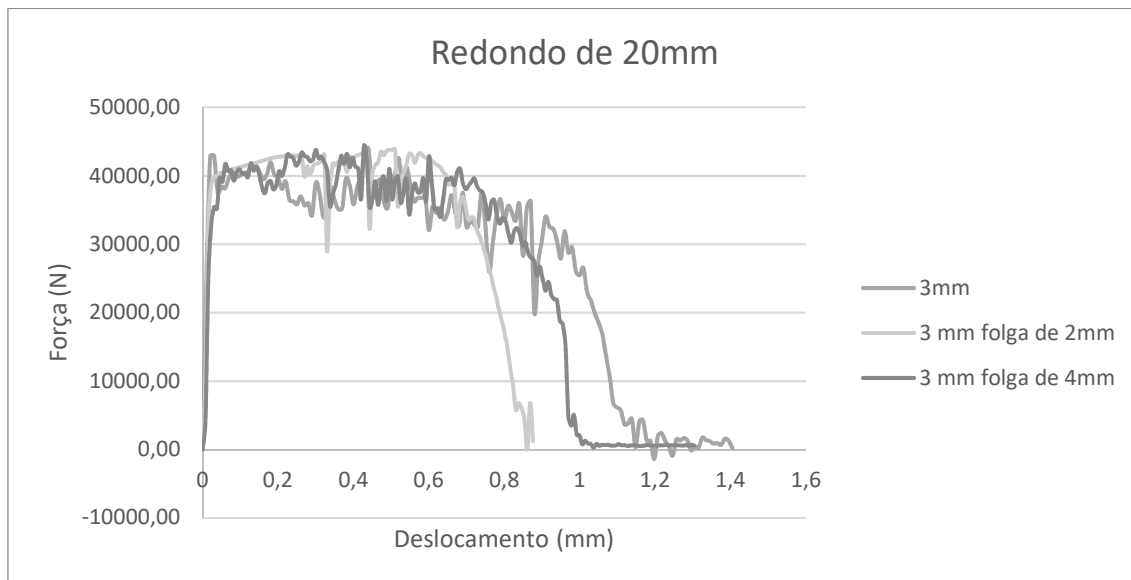


Figura 111 - Valores da força e deslocamentos obtidos nas análises da variação da folga.

Examinando as três análises, é possível verificar que os valores máximos obtidos para as forças de corte são muito similares, como é visível na Tabela 14.

Tabela 14 - Valor da força máxima do corte para cada uma das folgas analisadas.

Folga (mm)	Força máxima (N)
0,3	43862
0,2	43887
0,4	44355

Isto mostra que, para a máquina, a troca da matriz não vai implicar qualquer problema. Na Figura 112 é possível visualizar a rebarba deixada pelo corte da chapa de 3 mm com a folga de 0,2 mm.

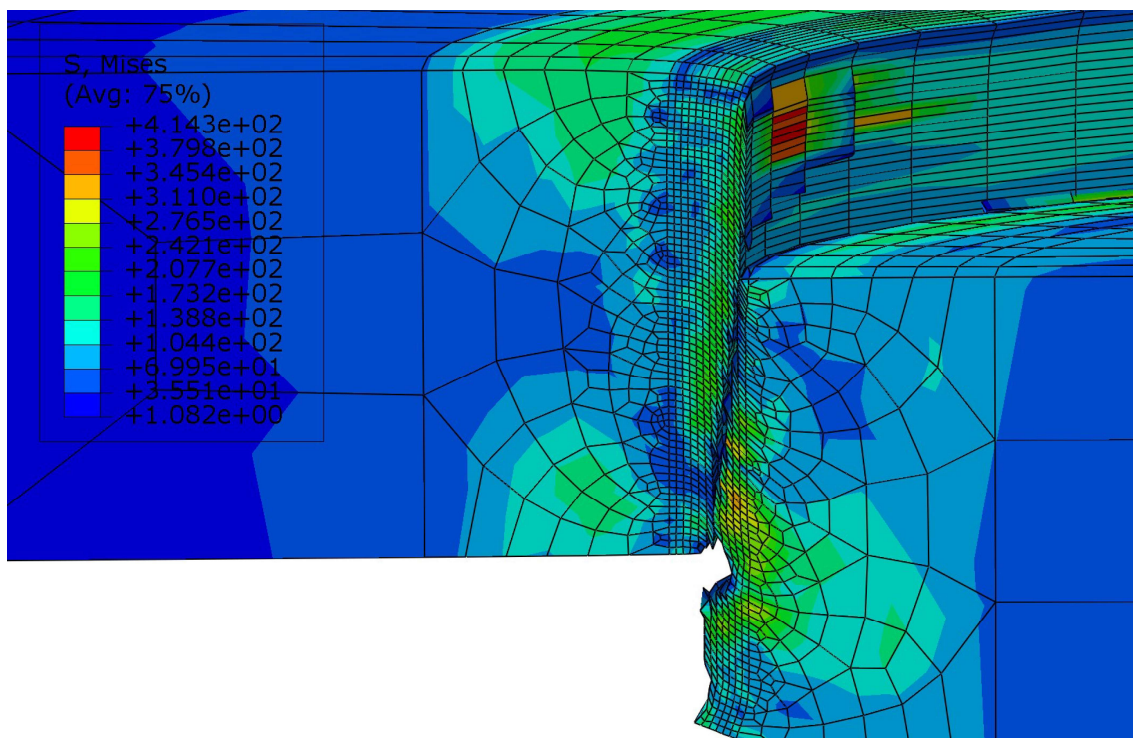


Figura 112 - Rebarba resultante do corte com folga de 0,2 mm em chapa de 3 mm.

Na Figura 113 é exibida a folga existente após o corte da capa de 3 mm com uma folga de 0,4 mm.

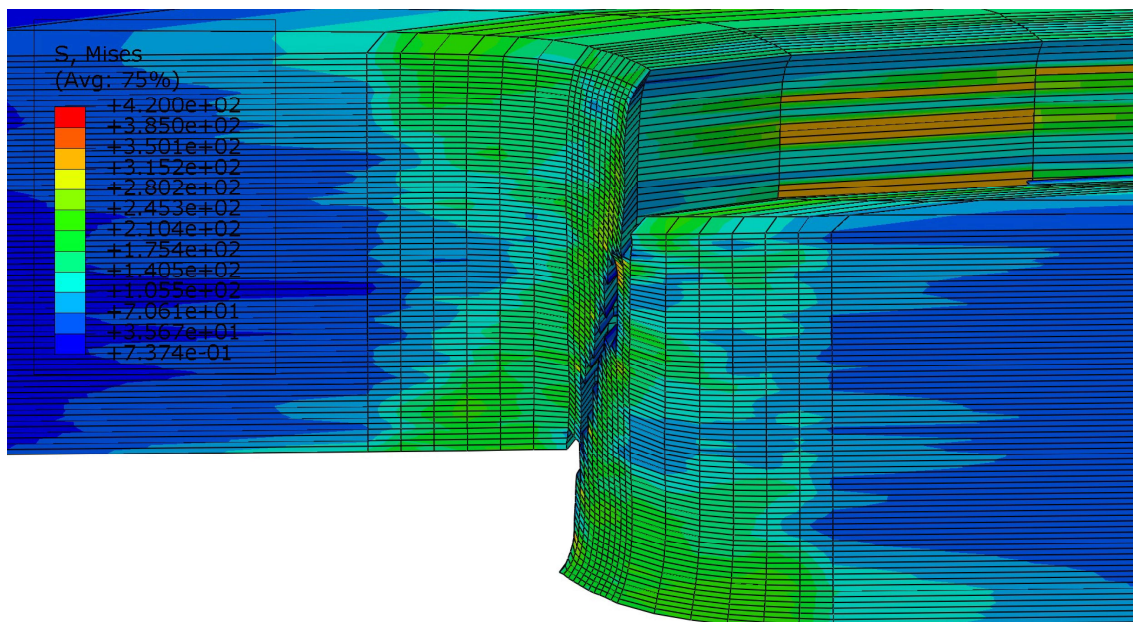


Figura 113 - Rebarba resultante do corte com folga de 0,4 mm em chapa de 3 mm.

Fazendo uma comparação puramente visual das imagens apresentadas, é possível constatar que a curvatura da chapa na zona onde foi realizado o corte é maior com a utilização da folga de 0,4 mm. Este fenómeno era já esperado, e demonstra que uma

grande folga tem como principal problema o surgimento de rebarbas demasiado grandes. No entanto, folgas mais pequenas levam a um maior desgaste das ferramentas, e como tal uma menor vida útil, aumentando assim os custos de operação.

Passa-se agora a analisar um outro tipo de possíveis defeitos, ou seja, a perda de concentricidade e de paralelismo.

Para que exista uma referência, e como as análises referidas são realizadas com o recurso à realização de um corte com as ferramentas quadradas de 10x10 mm² e em chapa de 3mm de espessura, primeiro realiza-se a análise ao corte sem os problemas apresentados.

Na Figura 114 pode-se ver o conjunto das ferramentas e a chapa para a realização desta análise, estando o punção e a matriz devidamente centrados, e com as faces de corte paralelas entre o punção e a matriz.

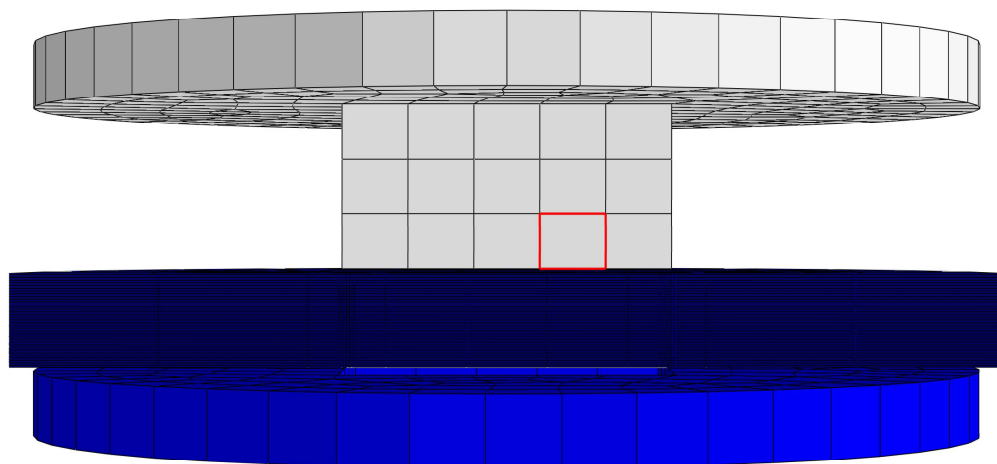


Figura 114 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm e chapa de 3mm, para o corte de forma correta.

Para o estudo da perda de concentricidade, tal como já referido, o punção continua com as paredes paralelas às paredes da matriz. No entanto, o punção encontra-se deslocado de forma a que uma das paredes esteja mais próxima do que as restantes. Este efeito pode ser observado na Figura 115, onde são apresentados os elementos para o ensaio da perda de concentricidade, e já na referida posição defeituosa.

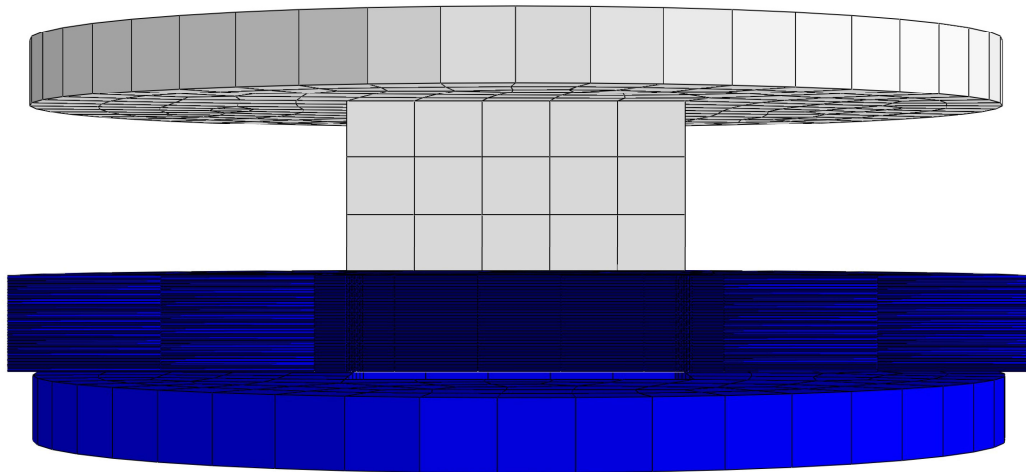


Figura 115 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm² e chapa de 3mm, para o corte de com perda de concentricidade.

Por fim, foi analisada a perda de paralelismo, isto é, as paredes do punção e da matriz passam a não estar paralelas, e tornam-se mais próximas num dos lados da parede do que no lado oposto da mesma parede. São assim apresentadas as ferramentas e chapa nessas mesmas condições na Figura 116.

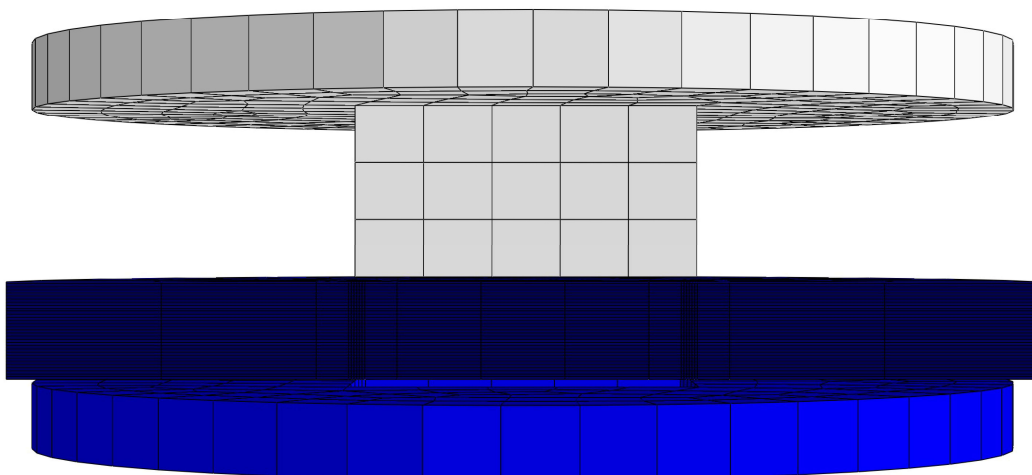


Figura 116 - Ferramentas quadradas de 10x10 mm² e chapa de 3mm, para o corte de com perda de paralelismo.

Os resultados das três análises realizadas e anteriormente referidas são apresentadas na Figura 117, onde é possível analisar a força de corte e o deslocamento do punção.

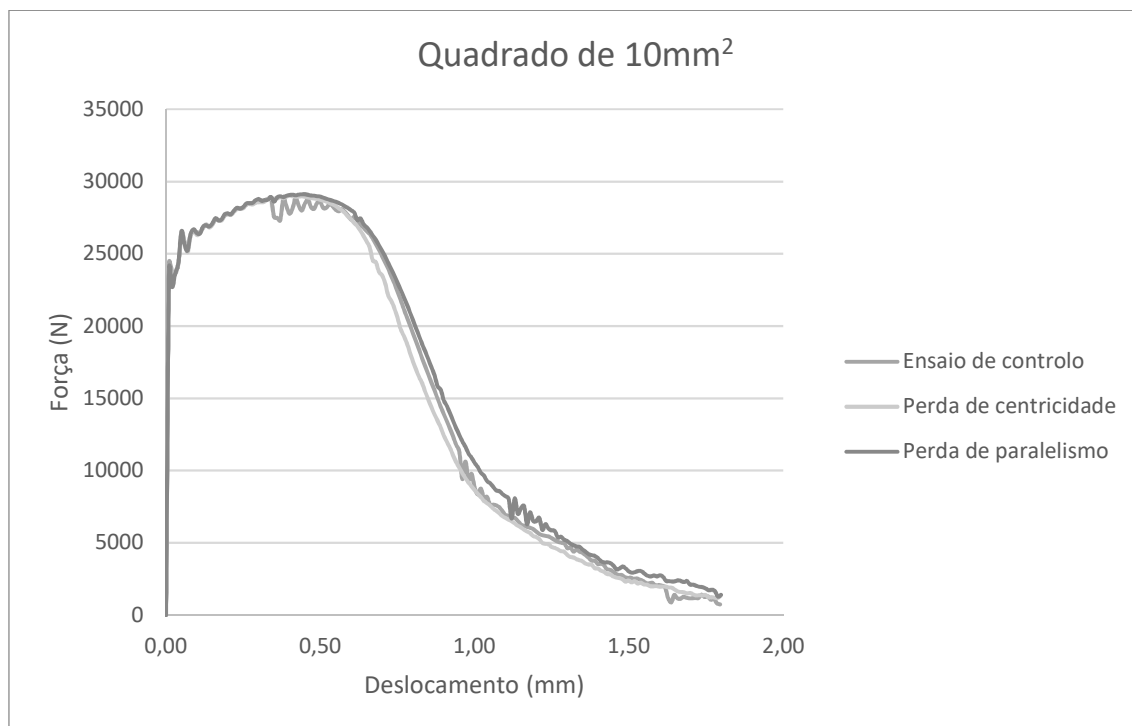


Figura 117 - Resultados das análises realizadas.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, mais uma vez, estes possíveis problemas não criam alterações no valor da força e do deslocamento relativamente ao processo de corte correto. De facto, como é visível na Tabela 15, as forças máximas obtidas são bastante idênticas e a forma como as forças se desenvolvem em relação ao deslocamento do punção são também em tudo idênticas.

Tabela 15 - Forças máximas obtidas das análises em estudo.

Condição	Força máxima (N)
Controlo	28883
Concentricidade	29025
Paralelismo	29124

No entanto, caso seja novamente realizada uma análise visual ao estado das faces do corte no instante final da realização do corte, verificam-se diferenças importantes.

Analisando a Figura 118, pode-se ver que as rebarbas são regulares em redor de todo o perímetro de corte.

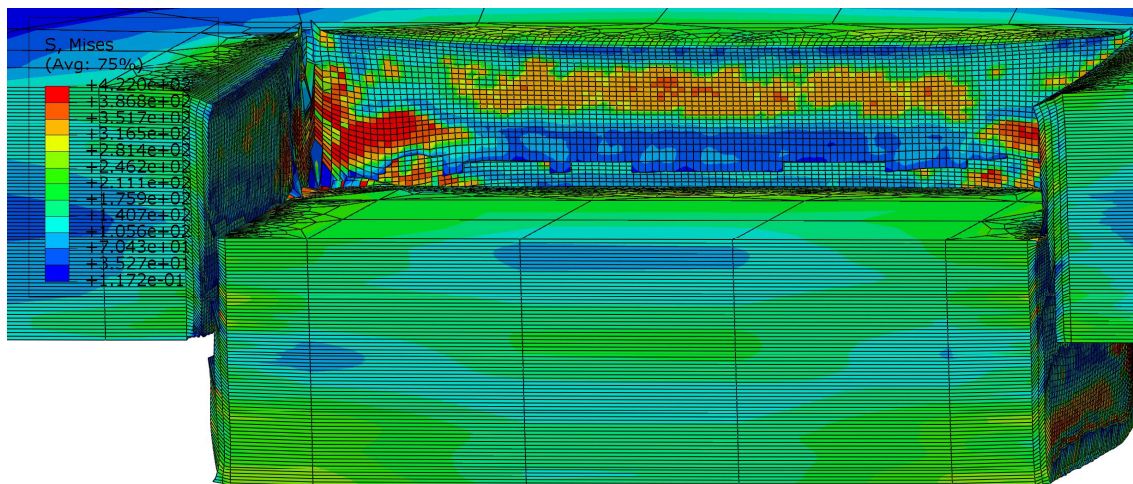


Figura 118 - Estado final da chapa após o corte em condições regulares.

No entanto, ao analisar a Figura 119, verifica-se que a rebarba não é regular, e que esta é maior na face da direita, face esta onde existia a maior folga, pelo facto de o punção estar deslocado para o lado oposto.

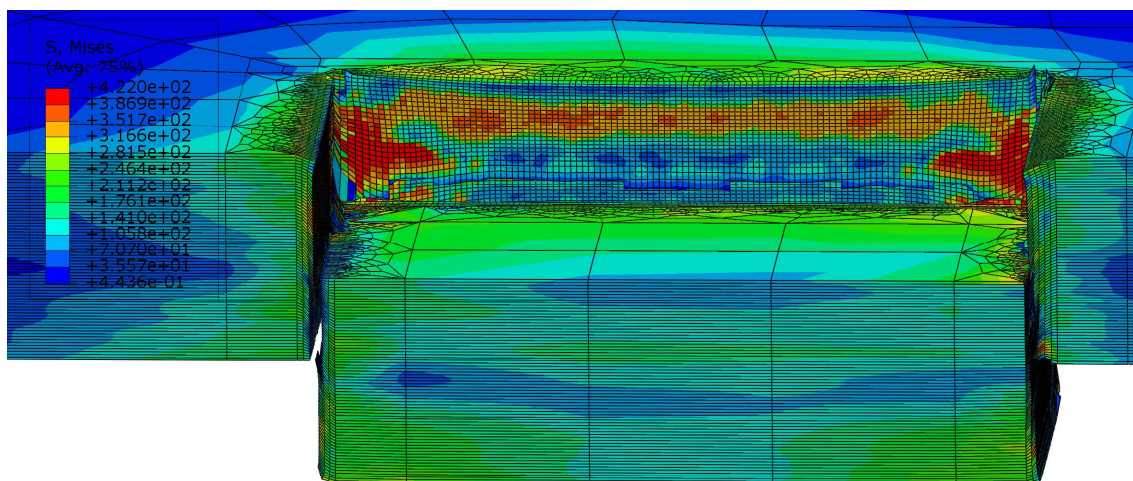


Figura 119 - Estado final da chapa após o corte com a perda de concentricidade.

Por fim, analisando a Figura 120, é possível verificar que, quando é perdido o paralelismo, a rebarba torna-se ainda mais irregular, pois a rebarba varia, não de face para face, mas sim ao longo de cada uma das faces.

Assim sendo, caso os defeitos sejam de pequena proporção e não provoquem colisões entre o punção e a matriz, este problema não vai criar um maior esforço para a máquina. No entanto, vão gerar maus acabamentos nas peças, para além de pequenos desvios dos cortes realizados.

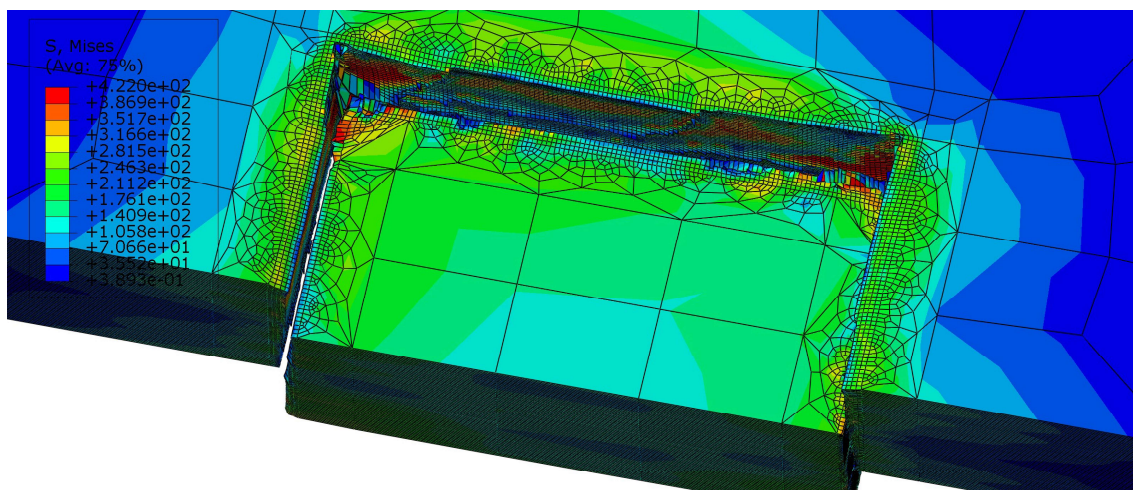


Figura 120 - Estado final da chapa após o corte com a perda de paralelismo.

3.6.5 Geometrias de penetração

Neste subcapítulo são analisados os resultados das análises realizadas aos punções com distintas geometrias de perfuração, ou seja, o punção de geometria regular, que serve de termo de comparação, os perfis em *Rooftop*, e o *Wisper*.

Este conjunto de análises é realizado executando um furo com o formato retangular de 15x5 mm², e o primeiro punção tem um perfil plano. Na Figura 121 são mostrados o punção, a matriz e o provete de chapa utilizados nesta análise.

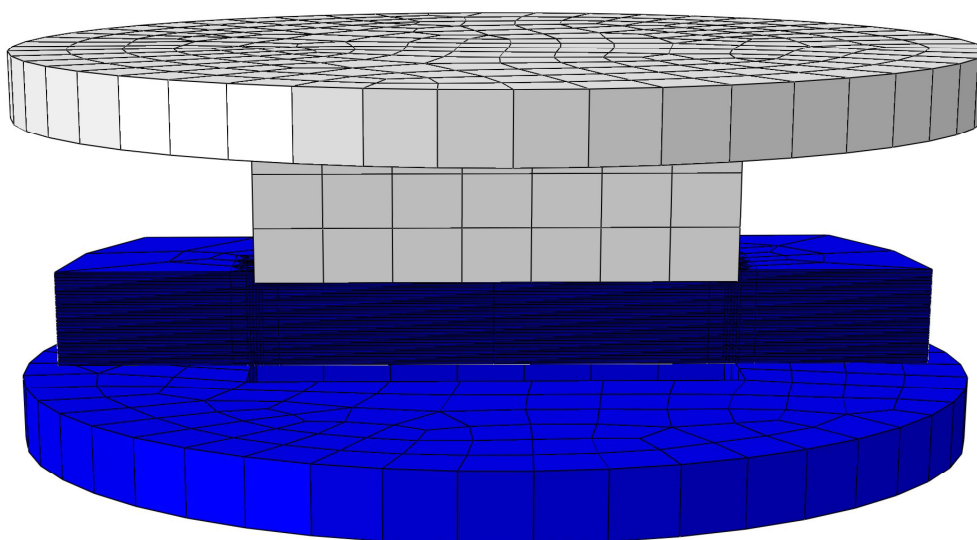


Figura 121 - Análise com punção retangular de perfil plano.

No decorrer da análise são obtidos os valores da força e do deslocamento para cada instante da análise. Estes valores são apresentados na Figura 122, sendo que se registra

um valor de força máxima de 28907 N. Nesta figura é possível verificar que o seu comportamento é idêntico ao dos punções circulares, e ao do quadrado, visto que todos eles, tal como este punção, têm um perfil de perfuração plano.

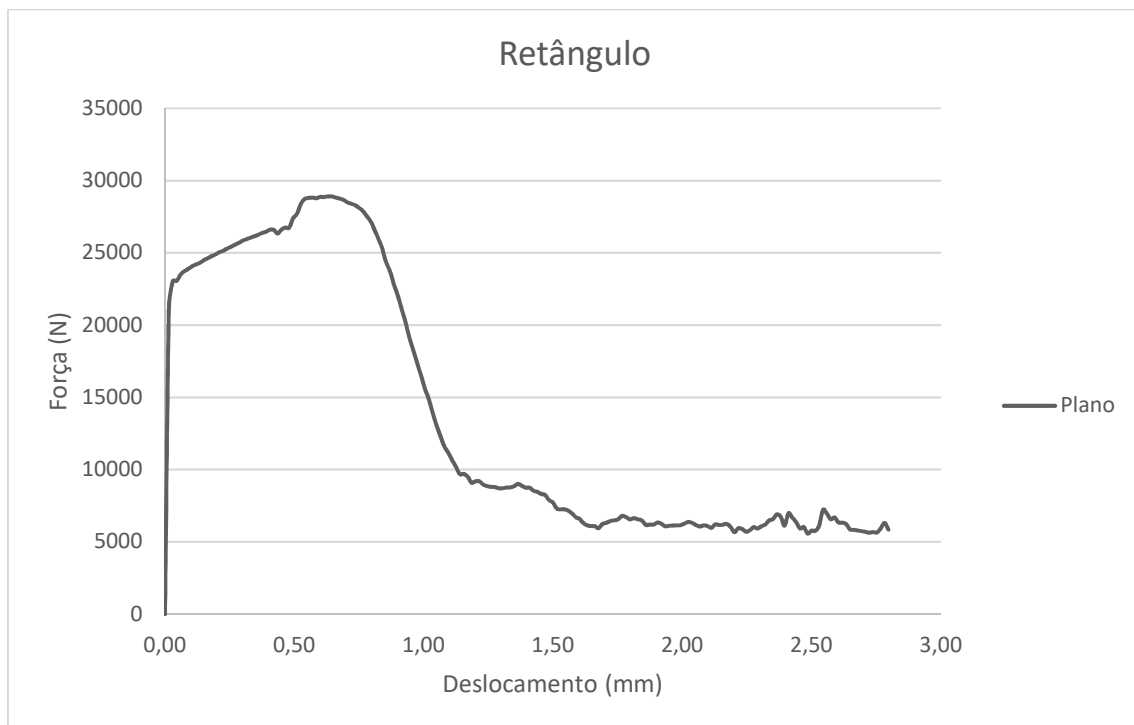


Figura 122 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm e punção plano.

De seguida, na Figura 123 é apresentado o conjunto onde se pode visualizar o punção com o perfil em *rooftop*, sendo que a matriz e o provete de chapa são exatamente iguais aos da análise com o punção de perfil plano.

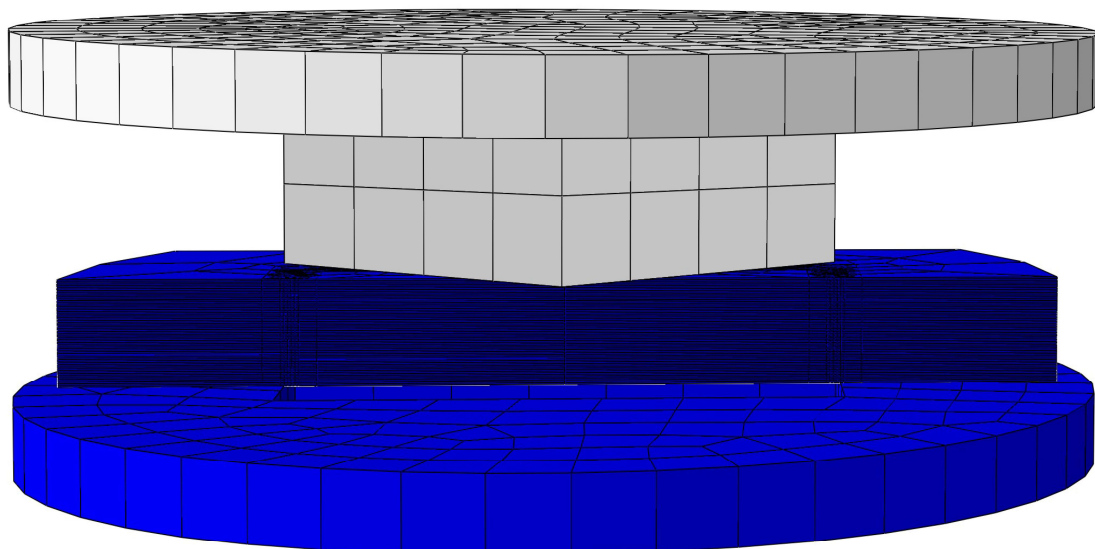


Figura 123 - Análise com punção retangular de perfil *rooftop*.

Os resultados obtidos no decorrer da análise são apresentados na Figura 124, onde é possível ver o desenvolvimento da força com o avanço do punção ao longo da análise. Com uma simples observação é de imediato possível verificar que o comportamento é distinto ao dos punções com o perfil plano, sendo registado um valor máximo de força de 28555 N, mas que neste caso, apesar de menor, pouco difere do valor do perfil plano.

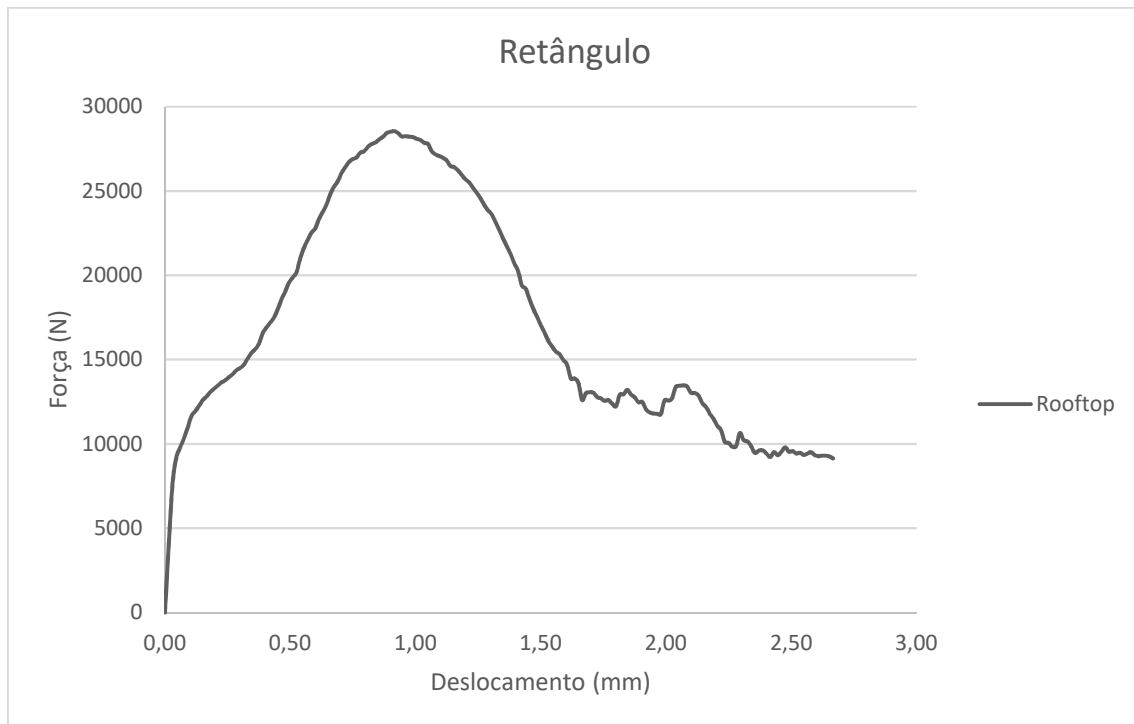


Figura 124 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm² e punção *rooftop*.

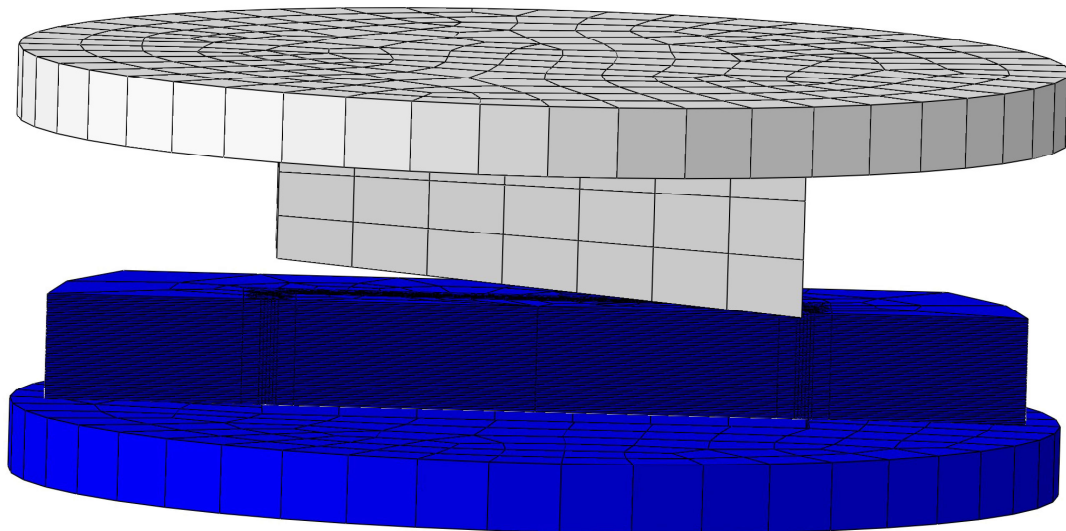


Figura 125 - Análise com punção retangular de perfil *wisper*.

Por fim, é apresentado o punção com o perfil *Wisper* (Figura 125). Tal como no caso do perfil com o punção *rooftop*, a matriz e o provete de chapa são iguais aos utilizados na análise do punção de perfil plano.

Na Figura 126 são apresentados os resultados da análise com o punção de perfil *Wisper*. Aqui pode-se verificar que a evolução da força com o avanço do punção é novamente distinta do comportamento do punção plano, assim como do punção de perfil *rooftop*. A força máxima registada nesta análise é de 22767 N, desta forma consideravelmente menor do que as forças registadas nas outras duas análises.

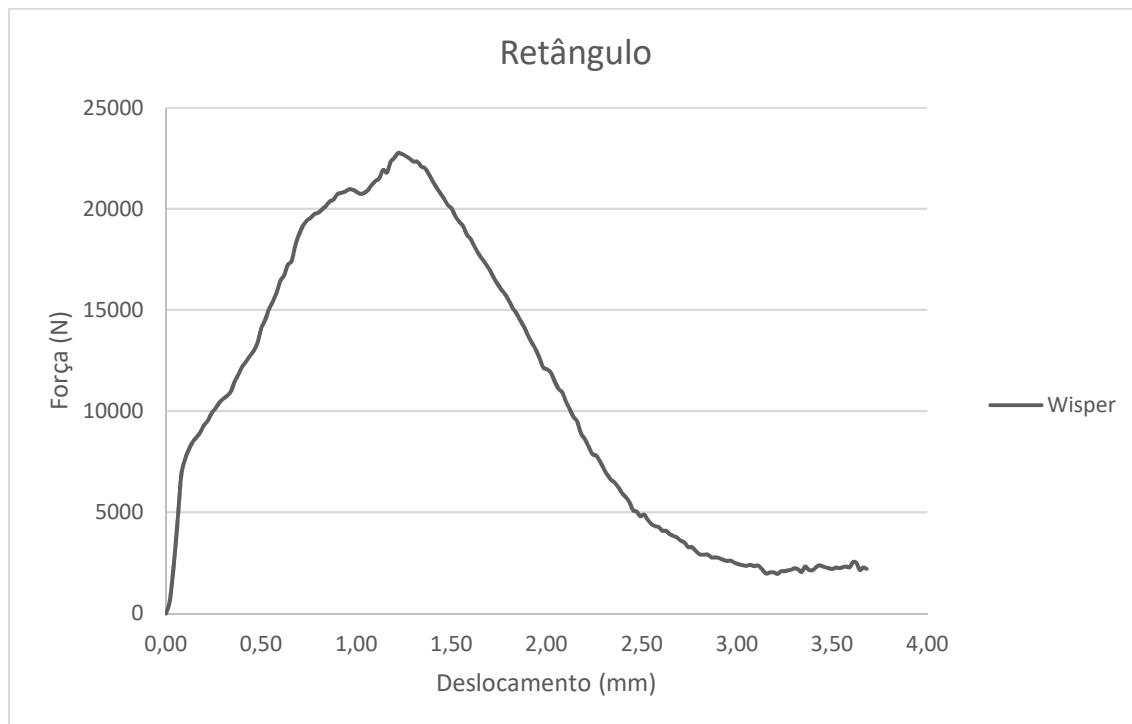


Figura 126 - Força e deslocamento da análise do retângulo 15x5 mm² e punção *wisper*.

Para melhor se entender os diferentes comportamentos das forças em cada uma das análises, na Figura 127 são apresentadas as forças resultantes das três análises em conjunto. Assim, para além das diferenças nos valores das forças máximas é mais acessível comparar o comportamento distinto que cada uma das análises apresenta.

Visualizando o comportamento das forças em conjunto, é possível verificar-se que o perfil plano, para além de apresentar o maior valor para a força máxima, apesar de pouco maior que o perfil *rooftop*, é também aquele em que a força máxima surge com menor penetração por parte do punção na chapa. O facto de o perfil *rooftop* apresentar um valor de força máxima próximo do valor do perfil plano é explicável pelo facto de que, quando toda a área do punção pressiona a chapa, ainda nenhuma parte da chapa está já a ser cortada por arrancamento. Quando começa o arrancamento, a força de corte começa a diminuir efetivamente.

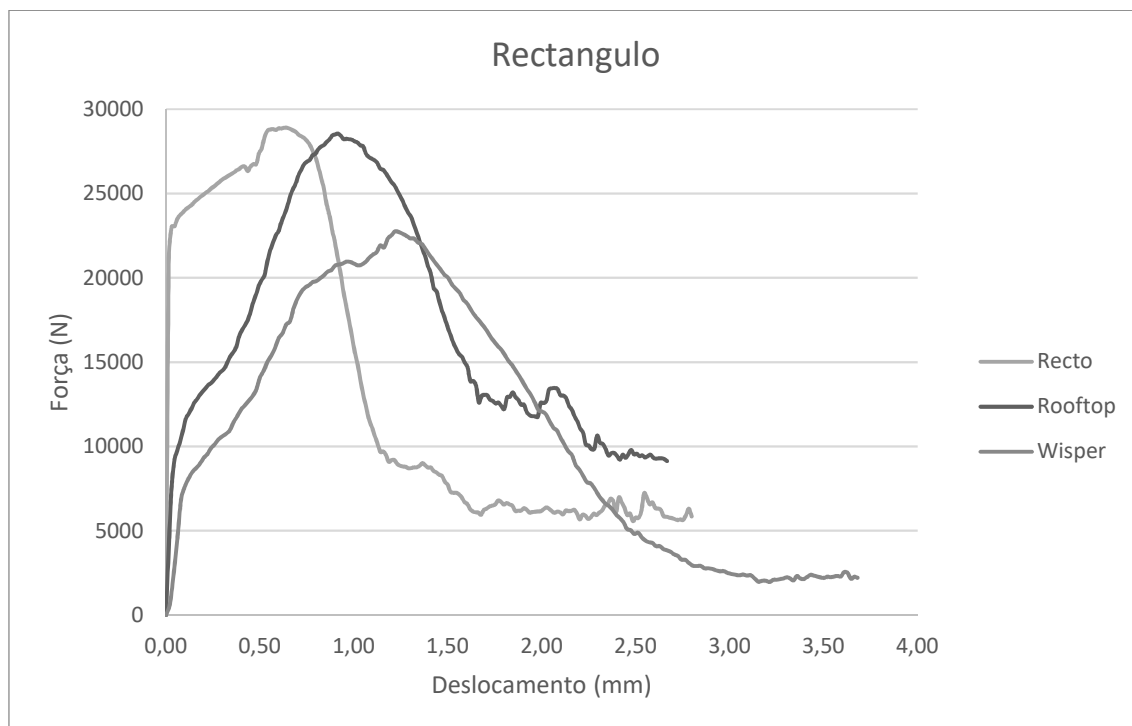


Figura 127 - Resultados das três análises em conjunto.

Por sua vez, o punção com perfil *wisper* apresenta claramente o menor valor para a força máxima. No entanto, para que o corte esteja completo, é aquele que exige um maior avanço do punção. Esta circunstância explica-se pelo facto de que, quando o corte já está na fase do arrancamento de um dos lados, no lado oposto o corte ainda se encontra na fase de corte por cisalhamento. Logo, o corte apenas fica completo quando o lado do punção com menor comprimento fica completo, mas é este desfaseamento que lhe permite apresentar a menor força máxima para o corte.

Apos terminar todas as análises realizadas, verifica-se que o punção quadrado de 10x10 mm² e o punção retangular de 15x5mm² têm exatamente o mesmo perímetro de corte, e analisando os perímetros de corte dos punções circulares o que apresenta o perímetro de corte mais próximo é o de 10 mm de diâmetro, apesar de um pouco menor.

Se for levado em linha de conta que, teoricamente, a área de corte não é importante, mas sim o perímetro, quer dizer então que os valores para as forças máximas nas análises destes três punções para uma mesma espessura de chapa têm de ser muito próximas.

Tabela 16 - Valores das forças máximas de corte para os mesmos perímetros de corte e diferentes áreas.

Geometria	Força máxima (N)
Quadrado 10x10 mm ²	28883
Retângulo de 15x5 mm ²	28907
Círculo de Ø 10 mm	22187

Examinando os valores para as forças máximas, apresentados na Tabela 16, verifica-se que, tal como esperado, aquando do corte de uma chapa da mesma espessura, e tendo o perímetro com uma dimensão igual, o valor das forças máximas é muito idêntico.

3.6.6 Respiro

Na análise do fabrico do respiro, como anteriormente referido, pretende-se analisar a execução de um corte e de uma deformação realizados em simultâneo.

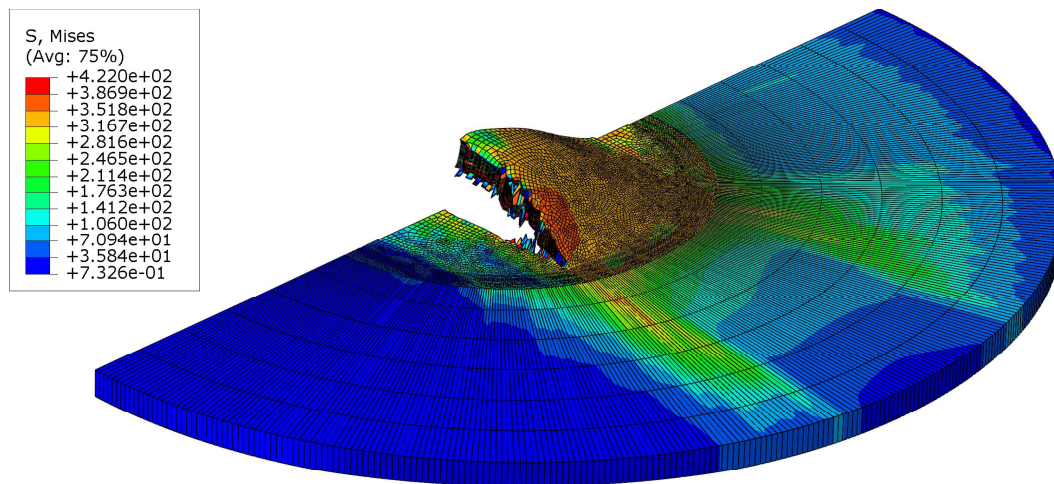


Figura 128 - Provete de chapa após a realização do ensaio.

Na Figura 128 é possível visualizar o resultado final de um golpe do punção para o fabrico do respiro no provete de chapa. De referir que, tal como na análise dos restantes processos que envolvem corte, este estudo foi realizado em apenas metade da chapa, tendo sido aplicadas condições de simetria para simular o corte completo.



Figura 129 - Força e deslocamento do processo de fabrico do respiro.

A força envolvida na execução da análise do respiro é apresentada na Figura 129, tal como o deslocamento que ocorre ao longo de toda a análise.

No decorrer da análise é possível verificar que, na fase inicial, tal como em todas as análises onde ocorre corte, a tensão vai aumentando até ao instante onde a compressão termina e se inicia o corte puro. Este instante pode ser visto na Figura 130.

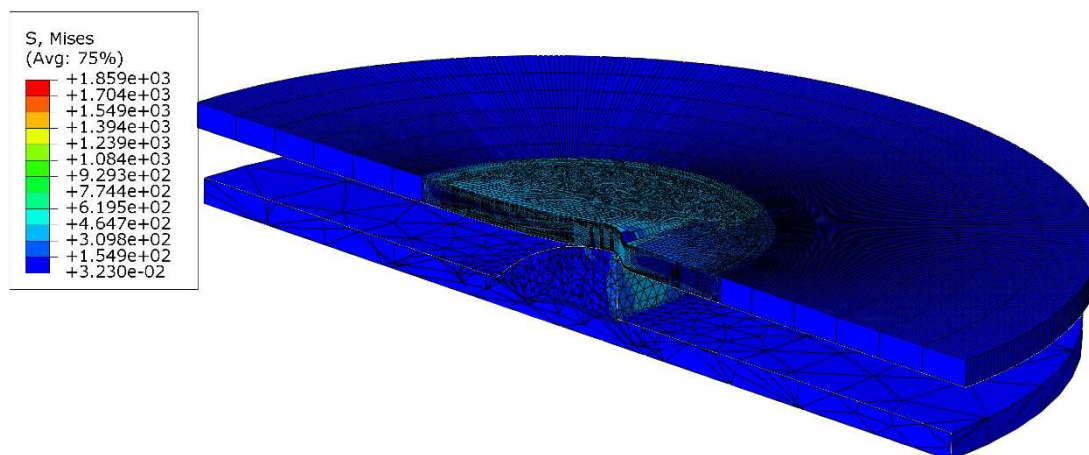


Figura 130 - Instante onde termina a fase de compressão e se inicia a fase do corte na análise da operação do respiro.

Neste instante, a força é de 5324 N e o punção deslocou-se 1,51 mm desde que realiza o contacto com a chapa.

A partir deste instante, e principiado o corte, a força necessária para progredir o corte vai diminuir, até que a uma pequena porção da chapa já está completamente cortada, como se pode ver pela Figura 131. Neste instante o punção deslocou-se 2,17 mm, e a força diminuiu até aos 3618 N.

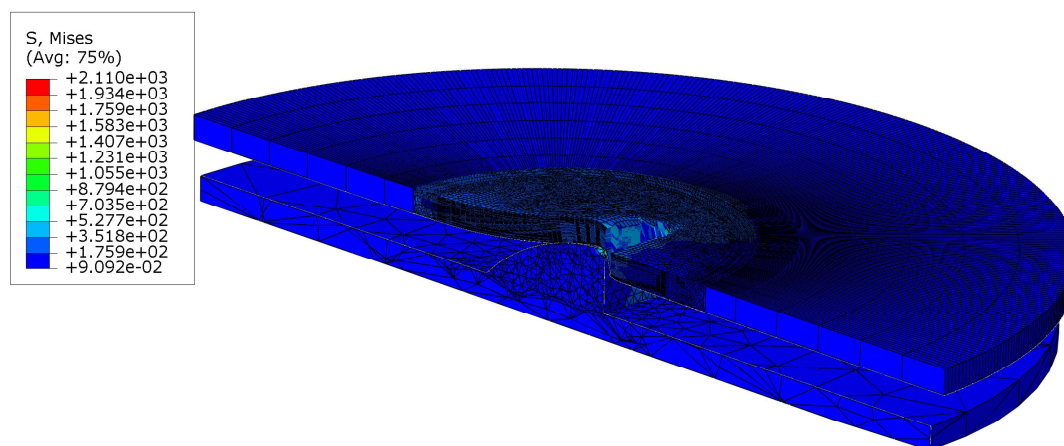


Figura 131 - Instante em que a primeira porção de chapa fica completamente cortada, zona central.

A partir deste instante, e como as condições se vão mantendo, ou seja, o corte e a deformação são aproximadamente constantes ao longo do processo, a força a força mantém-se aproximadamente igual, apenas aumentando ligeiramente até 4490 N.

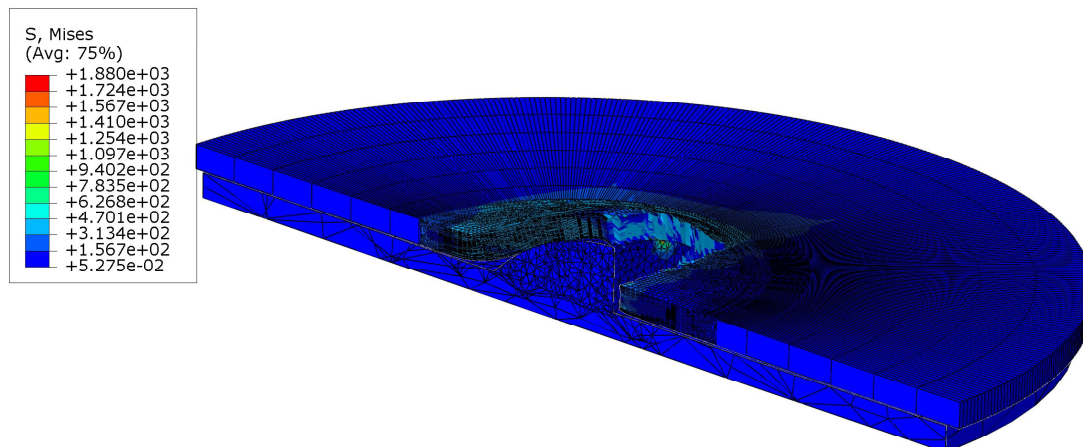


Figura 132 - Momento em que termina o corte.

No entanto, esta força volta a diminuir até 3919 N, aquando de um deslocamento de 4,85 mm por parte do punção. É também neste instante que termina a execução do corte, tal como da deformação. Tal como nas restantes operações onde é realizada deformação, neste mesmo instante o punção vai pressionar, com toda a sua área, a chapa contra a matriz e, como em todos os outros casos onde tal ocorre, a força exercida vai aumentar de forma abrupta.

3.7 Alterações propostas de equipamentos/ferramentas

Após a realização de todas as análises apresentadas ao longo do capítulo três, e tendo em conta que a maior parte delas foi realizada nas condições de trabalho em são executadas no dia a dia da empresa que acolheu este trabalho, pode-se afirmar que a empresa se encontra a trabalhar nas condições certas.

Como tal, é apenas possível dar alguns pequenos conselhos com vista a melhorar o desempenho e o acabamento das peças.

Em primeiro lugar, e tendo em conta os possíveis problemas analisados, verifica-se que, caso algum dos tipos de defeitos ocorra, aqueles que mais vão prejudicar as peças acabadas são aqueles que advêm dos problemas da máquina. Como tal, para que estes não ocorram, é essencial que a manutenção preventiva ocorra da forma recomendada pelo fabricante dos equipamentos.

E em segundo lugar, verificou-se que, de facto, a utilização de geometrias de penetração alternativas traz vantagens, pois, diminui a força máxima que a máquina terá de exercer

em cada golpe, assim como conduz a uma evolução da força mais gradual. Estes factos em conjunto vão poder prolongar a vida útil da máquina, tornando-a assim mais rentável.

E em terceiro e último lugar, como se verificou, caso a folga entre o punção e a matriz seja mais pequena ter-se-á um melhor acabamento, apesar de desta forma se comprometer a vida útil das ferramentas. No entanto, em casos muito especiais, onde o acabamento tenha maior importância, poderá ser positivo utilizar folgas menores, de forma a obter um melhor acabamento das peças.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Esta dissertação assenta no estudo do corte e estampagem realizado em punçoadora. Para tal, foram realizadas várias análises numéricas, de cada um destes tipos de operações, com o intuito de procurar um melhor entendimento de ambos os procedimentos, para procurar otimizar o trabalho realizado na empresa Caradonna. Após a realização deste trabalho, existe um melhor entendimento do corte por puncionamento, pois este permitiu entender a evolução do processo e as fases que o compõem, a parte da compressão, corte puro e por arrancamento.

Na primeira fase, a chapa é esmagada pelo punção contra a matriz, e a força de corte aumenta de forma muito rápida para valores próximos dos valores máximos logo de início, e continua depois a progredir até ao momento em que o material passa e sofrer corte.

Na fase do corte puro a chapa sofre os primeiros sinais de separação provocados pelo punção e pela matriz. Aqui a força continua quase constante, e as fendas continuam a progredir até ao momento em que a ligação restante já não suporta as forças que estão a ser exercidas.

Nesse instante inicia-se o corte por arrancamento. Aqui, o restante material que ainda prende o provete de chapa ao resto da chapa solta-se de forma mais abrupta. E a força vai diminuir de forma rápida.

Relativamente à estampagem, conclui-se que a forma e dimensão do estampado faz variar de forma significativa os valores das forças exercidas. Por outro lado, a evolução das forças aplicadas é mais gradual do que comparando com o corte.

Tendo em conta a bibliografia consultada e os resultados das análises realizadas, pode-se afirmar que na empresa Caradonna são já realizadas boas práticas no que a estes processos diz respeito.

A partir de uma análise a este trabalho, podem-se sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- A caracterização do material usado segundo os critério, elástico e plástico de Johnson-Cook;
- Um estudo aprofundado da influência de diferentes formas dos punções para a penetração na chapa;
- Estudo prático das forças envolvidas no corte por punção.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] H. Tschaetsch, *Metal Forming Practise Processes – Machines – Tools*. Springer, 2005.
- [2] E. S. Ccollection. (2018, Consultado em 07/03/2018). <http://www.eduresourcecollection.com/civil sm Elasticity.php>.
- [3] A. D. Santos, J. F. Duarte, and A. B. Rocha, *Tecnologia da Embotidura Princípios e Aplicações*. Porto, Portugal: Inegi, 2005.
- [4] T. Özgür, G. Nedim, and S. Ulvi, "Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies," *Materials & Design*, vol. 29, no. 5, pp. 1043-1050, 2008/01/01/ 2008.
- [5] J. F. Duarte, A. B. Rocha, and A. D. Santos, *Corte de ferramenta*. Porto, Portugal: INEGI, 2003.
- [6] M. Rachik, J. M. Roelandt, and A. Maillard, "Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, no. 1, pp. 256-265, 2002/10/06/ 2002.
- [7] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Nova York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [8] G. Dieter and D. Bacon, *Mechanical Metallurgy SI metricsl edition*. Londres, Reino Unido: Mc Graw-Hill Book Campany, 1986.
- [9] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica*. Lisboa, Portugal: Lisboa: Escolar Editora, 2010.
- [10] Manufacturingguide. (2018, Consultado em 20-04-2018). www.manufacturingguide.com/en/cold-rolling-sheets.
- [11] ESAB. (2018, Consultado em 17-02-2018). <http://pt.esab.net/pt/pt/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>.
- [12] M. Rossi, *Estampado en frio de la chapa*. Madrid, Espanha: Editorial Dossat, 1979.
- [13] G. Schuler, *Metal Forming Handbook*. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag, 1998.
- [14] PassSTANZTECHNIK, "Catalogue 10/2017-WW-T.1," ed, 2017.
- [15] LVD. (2018, Consultado em 20-04-2018). <https://www.lvdgroup.com/us/products/punch-presses>.
- [16] Euromac. (2018, Consultado em 25-03-2018). <http://www.euromac.com/en>.
- [17] Trumpf. (2018, Consultado em 24-03-2018). <https://www.trumpf.com/pt PT/>.
- [18] Accurl. (2018, consultado em 24-03-2018). <http://accurlcnc.com/>.
- [19] Amada. (2018, Consultado em 24-03-2018). <http://www.amada.pt/>.


- [20] Shopmetaltech. (2018, Consultado em 27/08/2018). <http://www.shopmetaltech.com>.
- [21] M. P. Tooling, "Catalog High performance tooling systems for Trumpf style presses," ed, 2012.
- [22] Meliorlaser. (2018, Consultado em 28/04/2018). <https://www.meliorlaser.hu/en/knowledge-center/punching-information-for-engineers>.
- [23] Tenroy. (2018, Consultado em 29/04/2018). <http://www.tenroytoolings.com>.
- [24] Trumpf, "Catalog PunchingTools 7-14," ed, 2017.
- [25] M. P. Tooling, "Catalog Thick Turret Stule Tooling," ed, 2017.
- [26] R. Campilho, *Método de Elementos Finitos Ferramentas para Análise Estrutural*. Porto, Portugal: Publindústria, 2012.
- [27] G. H. Majzoobi and F. R. Dehghan, "Determination of the constants of damage models,"
- [28] S. H. Khan. (2018, Consultado em 19/05/2018). <https://pt.scribd.com/doc/130548707/Johnson-Cook-Empirical-Models>.
- [29] M. Soderberg, "Finite Elements Simulation of Punching," Master, Departamento de Engenharia Mecânica, Lulea Unuversity of Technology, 2006.
- [30] Caradonna. (2018, Consultado em 19/05/2018). <http://www.caradonna.fr/en/>.
- [31] Echos. (2015, Consultado em 19/05/2018). https://issuu.com/echos-industrie/docs/echos-industrie_spe_cial_portugal.
- [32] TATA. (2018, Consultado em 14/07/2018). www.tatasteeleurope.com/en/products/engineering/hot-rolled/forming.
- [33] C. L. Rao, V. Narayanamurthy, and K. R. Y. Simha, *Applied Impact Mechanics*. West Sossex, Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [34] Accura. (2018, Consultado em 24/08/2018). www accuraservices.co.in.

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 ANEXO1

Fichas técnicas das ferramentas de deformação utilizadas, neste trabalho.



Fiche technique

Outil de nervurage

.....

.....

.....

.....

.....

.....

✉

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH+Co KG

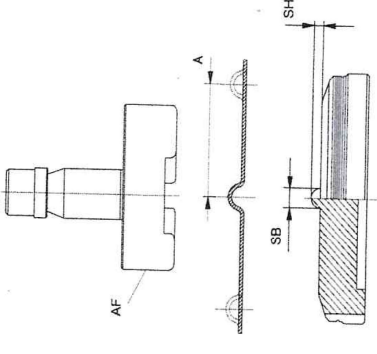
Geschäftsbereich Werkzeuge und Ersatzteile

D - 70839 Gerlingen

☎ 07156/303-6320

Telefax: 07156/303-6362

e-mail: info.tooling@de.trumpf.com



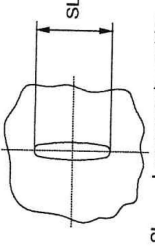
AF Surface de départ

A Distance

SB Largeur de nervurage

SH Hauteur de nervurage

Outil de nervurage Fig. 13254



SL Longueur de matrice

Matrice Fig. 13255

Champ d'application

Epaisseur de matériau : 0,8 - 3 mm

Hauteur de formage :

2 x 4	3 x 6	4 x 8	5 x 10
-------	-------	-------	--------

Hauteur de nervurage SH

2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
------	------	------	------

Distances :

2 x 4	3 x 6	4 x 8	5 x 10
-------	-------	-------	--------

Distance en X (A)

20 mm	30 mm (taille 1) 45 mm (taille 2)	45 mm	45 mm
-------	--------------------------------------	-------	-------

Dans certaines circonstances, il convient de sélectionner des distances minimales supérieures à celles indiquées lorsqu'une déformation importante survient selon la qualité de la tôle.

Longueur de matrice :

2 x 4	3 x 6	4 x 8	5 x 10
-------	-------	-------	--------

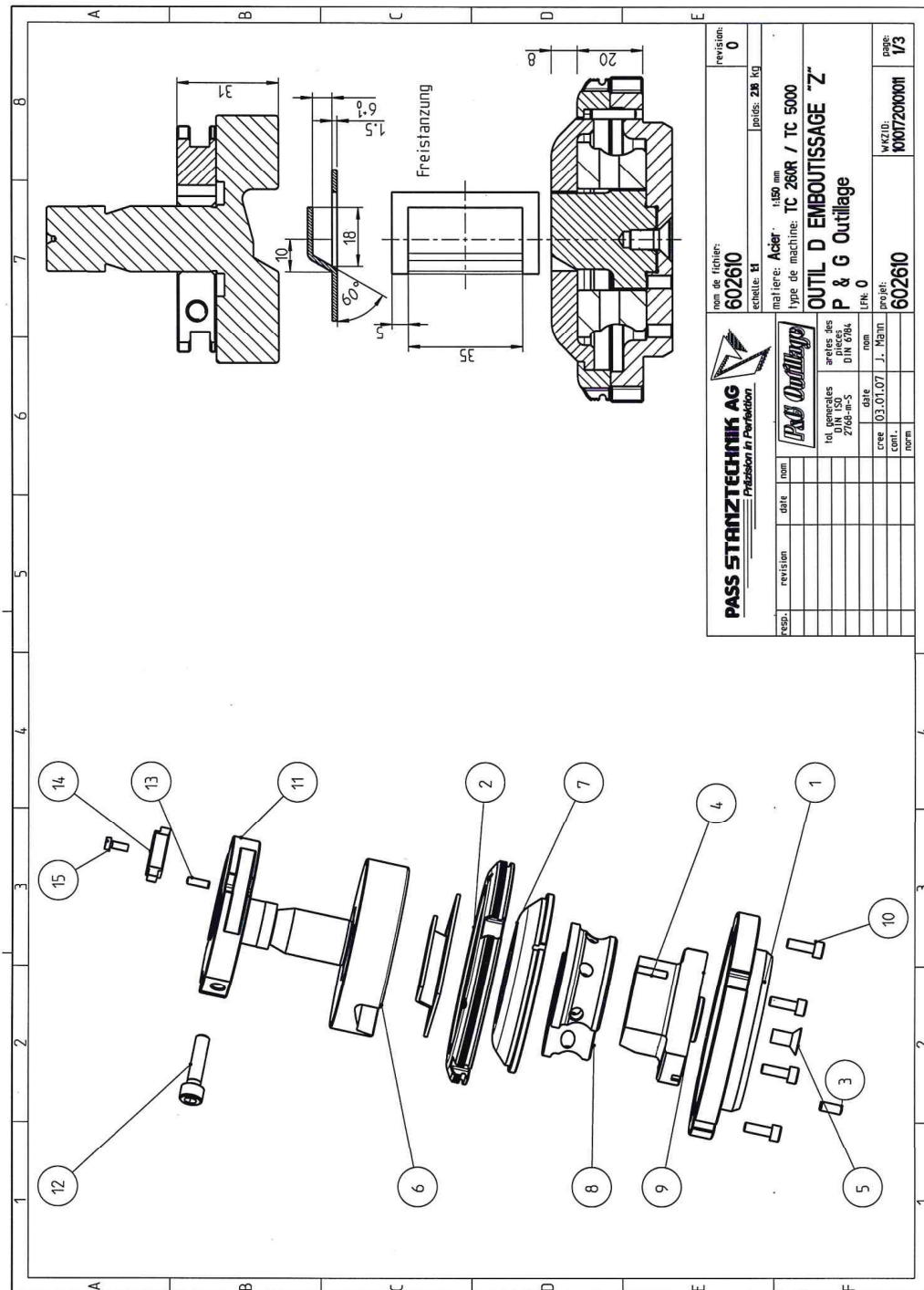
Longueur de matrice SL


10 mm	20 mm (taille 1) 29 mm (taille 2)	30 mm	36 mm
-------	--------------------------------------	-------	-------

Avance : 1 - 2 mm

La qualité de la surface de nervurage dépend de l'avance.

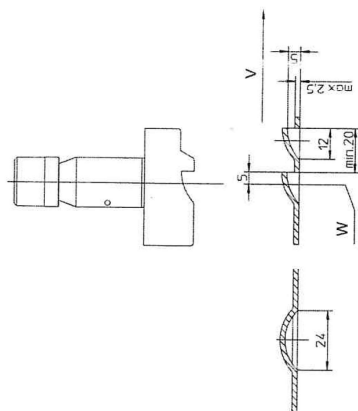
WZ12F/06.2001

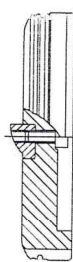




Fiche technique

Outil pour ouverture d'outies sans fin vers le haut, 12 x 5, taille 2






V Sens de déplacement de la tôle
W Centre de l'outil

Outil pour ouverture d'outies sans fin et distances

Fig. 13151



Orientation des distances

Fig. 13424

Outil

Composants de l'outil

Outil pour ouverture d'outies sans fin 12x5

Outil pour ouverture d'outies sans fin complet	7336-2W06/12
Poinçon d'ouverture d'outies	7336-5298.1-7
Matrice d'ouverture d'outies	7336-U144
Élément d'ouverture d'outies	7336-5315

Champ d'application

Épaisseur de matériau :

0,8 - 3,0 mm,

Sélection du poinçon d'ouverture d'outies en fonction de l'épaisseur de matériau souhalée.

Épaisseur de matériau	Poinçon
0,8 mm	.6
1,0 mm	.1
1,25 mm	.2
1,5 mm	.3
2,0 mm	.4
2,5 mm	.5
3,0 mm	.7

Hauteur de formage :

Avance :

1-2 mm

Sens de déplacement :


opposé à la surface de coupe de l'élément d'ouverture d'outies

20 mm mini. en X

parallèles en Y

Dans certaines circonstances, il convient de sélectionner des distances minimales supérieures à celles indiquées lorsqu'une déformation importante survient selon la qualité de la tôle.

L'outil ne doit être utilisé qu'à partir de la position de formage. L'épaulement du poinçon sert de surface de départ.



TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH+Co KG
Geschäftsbereich Werkzeuge und Ersatzteile
D - 70839 Gerlingen
☎ 07156/303-6320
Telefax: 07156/303-6362
e-mail: info.tooling@de.trumpf.com

Versandanschrift / Address / Adresse